



TESIS - SK142502

**ADSORPSI HIDROGEN PADA MATERIAL KARBON  
TERTEMPLAT ZEOLIT-Y DENGAN AKTIVASI  
 $K_2CO_3$**

FARRADINA CHORIA SUCI  
NRP. 1412 201 204

DOSEN PEMBIMBING  
NURUL WIDIASTUTI, M.Si., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN KIMIA FISIK  
JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



---

THESIS - SK142502

# **HYDROGEN ADSORPTION ON $K_2CO_3$ ACTIVATED ZEOLITE-Y TEMPLATED CARBON**

**FARRADINA CHORIA SUCI**  
**NRP. 1412 201 204**

**SUPERVISOR**  
**NURUL WIDIASTUTI, M.Si., Ph.D.**

**MAGISTER PROGRAM**  
**EXPERTISE FIELD OF PHYSICAL CHEMISTRY**  
**CHEMISTRY OF DEPARTMENT**  
**FACULTY MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**2015**

**Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

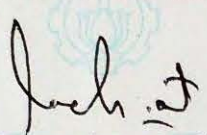
**Oleh :  
Farradina Choria Suci  
NRP. 1412 201 204**

**Tanggal Ujian : Februari 2015  
Tanggal Wisuda : Maret 2015**

**Disetujui oleh :**

  
**1. Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D  
NIP. 19710425 199412 2 001**

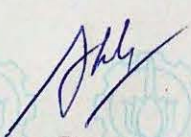
**(Pembimbing)**

  
**2. Lukman Atmaja, M.Si, Ph.D  
NIP. 19610816 198903 1 001**

**(Penguji)**

  
**3. Dr. Ir. Endah Mutiara MP., M.Si  
NIP. 19560102 198502 2 001**

**(Penguji)**

  
**4. Adi Setyo Purnomo, Ph.D  
NIP. 19800724 200812 1 002**

**(Penguji)**

**Direktur Program Pascasarjana,**

  
**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.  
NIP. 19640405 199002 1 001**

# **ADSORPSI HIDROGEN PADA MATERIAL KARBON TERTEMLAT ZEOLIT-Y DENGAN AKTIVASI $K_2CO_3$**

Nama Mahasiswa : Farradina Choria Suci  
NRP : 1412 201 204  
Pembimbing : Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D

## **ABSTRAK**

Penggunaan teknologi hidrogen sebagai sumber energi pada sel bahan bakar kendaraan bermotor masih memiliki kendala terutama dalam penyimpanan hidrogen. Zeolit templat karbon yang diaktivasi dengan  $K_2CO_3$  merupakan material dengan porositas tinggi dan luas permukaan yang besar. Hasil kapasitas adsorpsi hidrogen pada 30°C, 40°C dan 50°C adalah 3,206; 2,885 dan 2,458% berat, berturut-turut. Peningkatan kapasitas adsorpsi hidrogen dipengaruhi oleh suhu adsorpsi. Peningkatan suhu adsorpsi, menurunkan kapasitas adsorpsi hidrogen. Kapasitas adsorpsi hidrogen tertinggi diperoleh 3,821% berat pada suhu 30°C dan tekanan 3 bar. Model isoterm adsorpsi mengikuti model Langmuir yang didasarkan pada nilai koefisien korelasi regresi. Disisi lain, berdasarkan hasil karakterisasi XRD, SEM dan  $N_2$  adsorpsi-desorpsi mengindikasikan permukaan adsorbat yang heterogen sesuai model Freundlich. Parameter termodinamik menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung secara eksotermis dengan nilai  $\Delta H^\circ$  -18,610 kJ/mol. Proses adsorpsi mengikuti prinsip fisisorpsi karena nilai  $\Delta H^\circ$  kurang dari 80 kJ/mol. Adsorpsi berlangsung spontan yang dikonfirmasi melalui  $\Delta G^\circ$  yang bernilai negatif (-2,054; -1,058 dan -0,961 kJ/mol). Nilai perubahan entropi ( $\Delta S^\circ$ ) yang bernilai negatif menunjukkan penurunan ketidakteraturan antara permukaan gas-solid saat proses adsorpsi.

**Kata kunci** : karbon tertemplat zeolit-Y, material penyimpan hidrogen, adsorpsi hidrogen



# HYDROGEN ADSORPTION ON K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ACTIVATED ZEOLITE-Y TEMPLATED CARBON

Name : Farradina Choria Suci  
Student Identity Number : 1412 201 204  
Supervisor : Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D

## ABSTRACT

The utilization of hydrogen as a source of energy technologies in vehicle fuel cells still have a problem especially in the storage of hydrogen. Zeolite Templated Carbon (ZTC) activated K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> is a material with high porosity and large surface area. Results of hydrogen adsorption capacity at 30 °C, 40 °C, and 50 °C were 3.206, 2.885, and 2.458 %w, respectively. The amount of hydrogen adsorption capacity was affected by adsorption temperature. The increase of adsorption temperature, the decrease hydrogen adsorption. The highest hydrogen adsorption capacity was obtained 3.821%w at 30°C and pressure of 3 bar. Model isotherm adsorption results indicated that Langmuir model provided the best fit for the equilibrium data. In the other hand, based on the characterization results of XRD, SEM and N<sub>2</sub> adsorption-desorption indicated a heterogeneous surface adsorbate corresponding Freundlich models. Thermodynamics parameters showed that adsorption process was exothermic as confirmed by the enthalpy ( $\Delta H^\circ$ ) of -18.610 kJ/mol. Adsorption process followed the principles of physisorption because  $\Delta H^\circ$  values less than 80 kJ/mol. Adsorption through spontaneously confirmed by free energy change ( $\Delta G^\circ$ ) of (-2.054, -1.058 dan -0.961 kJ/mol). The entropy change ( $\Delta S^\circ$ ) was positive that indicated weak of entropy gas-solid surface during adsorption process.

**Keywords :** *zeolite-Y templated carbon, hydrogen storage material, hydrogen adsorption*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufiq, dan hidayah-Nya, sehingga penyusun dapat menyelesaikan penulisan tesis yang berjudul **“ADSORPSI HIDROGEN PADA MATERIAL KARBON TERTEMLAT ZEOLIT-Y DENGAN AKTIVASI K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>”** ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penyusunan tesis ini dapat terselesaikan tentunya tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan saran, dukungan dan nasehat. Pada kesempatan ini secara khusus penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada semua pihak yang telah berkenan membantu, baik secara moril ataupun materil, untuk itu penulis sangat berterima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D, selaku dosen pembimbing, atas segala upaya dalam membimbing dengan sabar, mengarahkan, memberikan logika berpikir, serta memberikan bekal ilmu yang sangat bermanfaat selama penulis melakukan penelitian hingga terselesaikannya penulisan tesis ini
2. Prof. Mardi Santoso, Ph.D, selaku Kaprodi Magister Kimia ITS
3. Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D, selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA-ITS
4. Prof. Didik Prasetyoko, M.Sc, selaku Kepala Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa LPPM-ITS
5. Lukman Atmaja, Ph.D, selaku Kepala Laboratorium Kimia Material dan Energi Jurusan Kimia FMIPA-ITS
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA-ITS atas bekal ilmu, nasehat dan motivasi yang telah diberikan selama ini
7. Analis Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa Material LPPM-ITS
8. Ayahanda dan Ibunda tercinta, serta adek dan keluarga besar atas dukungan, motivasi, serta doa yang senantiasa dipanjatkan selama ini
9. Rizky Dirga Pratama, terima kasih atas dukungan dan doa yang diberikan
10. Sahabat-sahabat GH Family (Ratih, Mas Dian, Mas Alam, Mas Denni, Bimo dan Emsal) yang selalu ada dan memberikan dukungan di setiap kesempatan
11. Teman-teman S1,S2,S3 Kimia FMIPA-ITS, teman-teman tim riset serta adek-adek seperjuangan yang selalu memberi semangat, Audiya, Rika, Aini, Triyanda dan Venta, serta semua pihak yang telah memberi dukungan dan membantu dalam penyelesaian penyusunan tesis ini

Penulis menyadari bahwa masih banyak terdapat kekurangan dalam penulisan tesis ini. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak.

Surabaya, Februari 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar belakang .....	1
1.2 Perumusan masalah .....	7
1.3 Tujuan Penelitian .....	7
1.4 Batasan Penelitian.....	7
1.5 Manfaat Penelitian .....	7
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>9</b>
2.1 Hidrogen sebagai Sumber Energi .....	11
2.2 Penyimpanan Hidrogen .....	14
2.3 Material Berpori.....	18
2.3.1 Zeolit.....	19
2.3.2 Karbon.....	25
2.4 Karbon Tertemplat Zeolit sebagai Material Penyimpan Hidrogen.....	28
2.5 Mekanisme Penyimpanan Hidrogen pada Material Berpori .....	34
2.6 Studi Adsorpsi Hidrogen pada Material Berpori .....	36
2.7 Teori Adsorpsi Hidrogen.....	44
2.7.1 Isoterm Adsorpsi.....	44
2.7.1.1 Isoterm Adsorpsi Langmuir .....	44
2.7.1.2 Isoterm Adsorpsi Freundlich .....	45
2.7.1.3 Isoterm Adsorpsi Tempkin .....	47
2.7.1.4 Isoterm Adsorpsi Sips .....	48

2.7.2 Termodinamika Adsorpsi.....	49
2.8 Karakterisasi.....	50
2.8.1 <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	50
2.8.2 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	53
2.8.3 <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR) .....	54
2.8.4 Analisis Adsorpsi Gas ( <i>Gas Sorption Analysis</i> ).....	56
2.8.4.1 <i>Brunauer-Emmett-Teller</i> (BET).....	59
2.9 Metode Pengukuran Kapasitas Penyimpanan Hidrogen .....	60
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b> .....	63
3.1 Alat dan Bahan .....	63
3.1.1 Alat.....	63
3.1.2 Bahan.....	63
3.2 Prosedur Kerja.....	63
3.2.1 Sintesis Zeolit-Y.....	63
3.2.2 Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit-Y.....	64
3.2.2 Aktivasi Karbon Tertemplat Zeolit dengan $K_2CO_3$ .....	66
3.2.3 Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit Sebelum dan Setelah Aktivasi dengan $K_2CO_3$ .....	67
3.3 Studi Adsorpsi Hidrogen.....	68
3.3.1 Penentuan Kapasitas Penyimpanan Hidrogen.....	68
3.3.2 Penentuan Isoterm Adsorpsi.....	70
3.3.3 Penentuan Termodinamika Adsorpsi.....	70
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	71
4.1 Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-Y.....	71
4.2 Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi $K_2CO_3$ .....	82
4.3 Studi Adsorpsi Hidrogen .....	89
4.3.1 Penentuan Kapasitas Penyimpanan Hidrogen .....	89
4.3.2 Perbandingan Sifat Permukaan Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi $K_2CO_3$ sebelum dan setelah adsorpsi .....	94
4.3.3 Perbandingan Hasil Spektra FTIR pada Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi $K_2CO_3$ sebelum dan setelah adsorpsi	95



4.3.4 Isoterm Adsorpsi .....	97
4.3.4.1 Isoterm Adsorpsi Langmuir .....	97
4.3.4.2 Isoterm Adsorpsi Freundlich .....	99
4.3.4.3 Isoterm Adsorpsi Tempkin .....	102
4.3.4.4 Isoterm Adsorpsi Sips .....	104
4.3.4.5 Perbandingan terhadap 4 Model Isoterm Adsorpsi .....	106
4.3.5 Termodinamika Adsorpsi.....	108
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>113</b>
5.1 Kesimpulan .....	113
5.2 Saran .....	114
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>115</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>131</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Prosentase sumber energi primer yang digunakan di dunia..	9
Gambar 2.2	Proyeksi energi primer dunia .....	10
Gambar 2.3	Proyeksi model iklim dari pemanasan permukaan pada awal dan akhir abad ke-21.....	11
Gambar 2.4	Satuan dasar penyusun zeolit yang tersusun dari tetrahedral $\text{SiO}_4$ dan $\text{AlO}_4$ dengan atom oksigen sebagai penghubung atau jembatan.....	19
Gambar 2.5	Struktur kerangka zeolit pada dua dimensi dan tiga dimensi	20
Gambar 2.6	Struktur Unit Bangun Sekunder .....	21
Gambar 2.7	Sodalit atau sangkar $\beta$ , dirangkai untuk membentuk struktur zeolit-A, zeolit-Y, dan zeolit-EMT .....	22
Gambar 2.8	Skema menjelaskan keseluruhan templat prosedur sintesis untuk karbon berpori menggunakan templat zeolit-Y .....	29
Gambar 2.9	Skematik pengisian pori adsorben oleh molekul adsorbat....	34
Gambar 2.10	Fenomena adsorpsi dan desorpsi .....	36
Gambar 2.11	Grafik pengaruh tekanan (a) dan suhu (b) pada adsorpsi hidrogen .....	38
Gambar 2.12	Plot grafik isoterm adsorpsi Langmuir .....	45
Gambar 2.13	Plot grafik isoterm adsorpsi Freundlich .....	46
Gambar 2.14	Plot grafik isoterm adsorpsi Tempkin .....	48
Gambar 2.15	Plot grafik isoterm adsorpsi Sips .....	49
Gambar 2.16	Difraksi Bragg pada dua bidang kisi.....	51
Gambar 2.17	(a) Pola XRD karbon teremplat zeolit (b) Pola XRD zeolit- $\text{NH}_4\text{Y}$ .....	52
Gambar 2.18	Zeolit- $\text{NH}_4\text{Y}$ pada berbagai tahap karbonisasi .....	53
Gambar 2.19	Skema kerja <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	54
Gambar 2.20	(a) zeolit- $\text{NH}_4\text{Y}$ , (b) zeolit- $\text{NH}_4\text{Y}$ yang telah ditambahkan prekursor furfural alkohol (FA), dan (c) komposit zeolit/karbon setelah proses karbonisasi pada suhu $650^\circ\text{C}$ selama 4 jam .....	54

Gambar 2.21	Spektrum IR a) $K_2CO_3$ ; b) Karbon tertemplat zeolit; c) $K_2CO_3$ / Karbon = 0,5; d) $K_2CO_3$ / Karbon = 1; e) $K_2CO_3$ / Karbon = 1,5; f) $K_2CO_3$ / Karbon = 2 .....	55
Gambar 2.22	Proses adsorpsi monolayer dan multilayer .....	57
Gambar 2.23	Tipe grafik isotherm adsorpsi-desorpsi gas.....	57
Gambar 2.24	Adsorpsi (simbol hitam) dan desorpsi (simbol putih) isotherm untuk USY zeolit templat dan karbon berbasis sukrosa .....	58
Gambar 2.25	Skematik <i>Thermograph Microbalance Aparatus</i> (TMA) ....	60
Gambar 3.1	Skema alat uji adsorpsi hidrogen pada proses <i>degassed</i> .....	69
Gambar 3.2	Skema alat uji adsorpsi hidrogen pada proses adsorpsi.....	70
Gambar 4.1	a) <i>Seed gel</i> , b) <i>Feedstock gel</i> , dan c) <i>Overall gel</i> setelah proses hidrotermal .....	72
Gambar 4.2	Padatan zeolit-Y hasil sintesis .....	73
Gambar 4.3	(a) Pola XRD Zeolit-Y hasil sintesis dan (b) standar zeolit-Y ( $Na_2Al_2Si_4,7O_{13,4} \cdot xH_2O$ ) JCPDS No.11-0672 .....	74
Gambar 4.4	Mikrograf representatif SEM zeolit-Y .....	75
Gambar 4.5	Tahap impregnasi sukrosa dalam zeolit-Y hingga dihasilkan gel .....	76
Gambar 4.6	Komposit karbon/zeolit setelah karbonisasi pada suhu $800^\circ C$ .....	77
Gambar 4.7	Karbon tertemplat zeolit-Y .....	79
Gambar 4.8	Pola difraktogram (a) zeolit-Y hasil sintesis, (b) komposit karbon/ zeolit, dan (c) karbon tertemplat zeolit .....	80
Gambar 4.9	Mikrograf SEM karbon tertemplat zeolit .....	81
Gambar 4.10	Pola difraktogram (a) Karbon tertemplat zeolit dan (b) Karbon tertemplat zeolit aktivasi $K_2CO_3$ / Karbon= 1,5 .....	87
Gambar 4.11	Mikrograf SEM karbon tertemplat zeolit setelah aktivasi dengan $K_2CO_3$ .....	88
Gambar 4.12	Grafik pola adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit teraktivasi dengan perbandingan $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 pada tekanan 1 (a) 1 bar; (b) 1,5 bar (c) 2 bar dan (d) 3 bar.....	90

Gambar 4.13	Mekanisme masuknya gas hidrogen pada permukaan karbon tertemplat zeolit-Y yang telah di aktivasi dengan perbandingan rasio $K_2CO_3$ /Karbon sebesar 1,5.....	91
Gambar 4.14	Spektrum IR a) $K_2CO_3$ ; b) Karbon tertemplat zeolit; c) $K_2CO_3$ / Karbon = 1,5 sebelum mengadsorp hidrogen; d) $K_2CO_3$ / Karbon = 1,5 setelah mengadsorp hidrogen.....	96
Gambar 4.15	Kurva isoterm adsorpsi Langmuir untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan $K_2CO_3$ /Karbon 1,5...	98
Gambar 4.16	Kurva isoterm adsorpsi Freundlich untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan $K_2CO_3$ /Karbon 1,5...	100
Gambar 4.17	Kurva isoterm adsorpsi Tempkin untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 ...	102
Gambar 4.18	Kurva isoterm adsorpsi Sips untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 .....	104
Gambar 4.19	Grafik $\ln P$ vs $1/T$ .....	109

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan sifat kimia dan fisik bahan bakar hidrogen, metana, dan bensin .....	13
Tabel 2.2	Kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa jenis zeolit.....	23
Tabel 2.3	Kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa material karbon	26
Tabel 2.4	Kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa material karbon tertemplat zeolit.....	29
Tabel 2.5	Sifat permukaan karbon tertemplat zeolit yang disintesis dengan sukrosa sebagai prekursor karbon .....	32
Tabel 2.6	Perbedaan antara adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia .....	37
Tabel 2.7	Adsorpsi hidrogen pada beberapa jenis material berpori dengan variasi suhu dan tekanan.....	38
Tabel 2.8	Isoterm dan kinetika adsorpsi hidrogen dengan berbagai jenis material berpori.....	40
Tabel 2.9	Penggunaan variasi suhu dan tekanan pada proses adsorpsi dengan berbagai jenis adsorbat gas .....	42
Tabel 2.10	Entalpi dan entropi adsorpsi hidrogen dengan berbagai jenis material berpori .....	43
Tabel 2.11	Sifat fisik permukaan karbon tertemplat zeolit-Y.....	58
Tabel 4.1	Hasil variasi suhu dan tekanan saat adsorpsi hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit-Y teraktivasi $K_2CO_3$ pada rasio $K_2CO_3$ /Karbon 1,5.....	92
Tabel 4.2	Sifat fisik permukaan karbon tertemplat zeolit aktivasi $K_2CO_3$ /Karbon=1,5 sebelum dan setelah mengadsorp $H_2$ .....	94
Tabel 4.3	Parameter isoterm adsorpsi Langmuir untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon tertemplat zeolit teraktivasi $K_2CO_3$ .....	98
Tabel 4.4	Parameter isoterm adsorpsi Freundlich untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon tertemplat zeolit teraktivasi $K_2CO_3$ .....	101
Tabel 4.5	Parameter isoterm adsorpsi Tempkin untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon tertemplat zeolit teraktivasi $K_2CO_3$ .....	103

Tabel 4.6	Parameter isotherm adsorpsi Sips untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon tertemplat zeolit teraktivasi $K_2CO_3$ .....	105
Tabel 4.7	Ringkasan dari perhitungan isotherm adsorpsi .....	106
Tabel 4.8	Parameter termodinamika adsorpsi gas hidrogen pada meterial karbon tertemplat zeolit-Y .....	110



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Skema Kerja.....	131
Lampiran B	Perhitungan Formula Zeolit-NaY.....	136
Lampiran C	Perhitungan Molaritas Aktivator $K_2CO_3$ .....	141
Lampiran D	Perhitungan Pengenceran Larutan.....	142
Lampiran E	Data dan Grafik XRD Standar Zeolit-Y.....	143
Lampiran F	Data dan Grafik Hasil Analisis XRD Zeolit-NaY Hasil Sintesis.....	145
Lampiran G	Data dan Grafik Analisis XRD Komposit Karbon/Zeorit-Y...	147
Lampiran H	Grafik Hasil Analisis XRD Karbon Tertemplat Zeolit Sebelum dan Setelah Proses Aktivasi.....	149
Lampiran I	Gambar Hasil Analisa SEM.....	150
Lampiran J	Data Isotermal Adsorpsi-Desorpsi $N_2$ .....	152
Lampiran K	Perhitungan Kapasitas Penyimpan Hidrogen.....	157
Lampiran L	Perhitungan Analisa Data Isoterm .....	189
Lampiran M	Perhitungan Analisa Data Termodinamika .....	197

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Energi hidrogen merupakan energi non karbon yang berpotensi jangka panjang sebagai bahan bakar alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil konvensional (Dutta, 2013). Hidrogen adalah sumber energi terbarukan yang bersih dan efisien, karena pembakaran hidrogen dengan oksigen hanya menghasilkan uap air dan energi. Selain itu densitas energi gravimetri hidrogen mencapai 33,3 kWh/kg dan nilai kalor yang dihasilkan tiga kali lebih besar dibandingkan bensin (Froudakis, 2011; Corbo, 2011; dan Cipriani, 2014). Keunggulan hidrogen yang lain adalah biaya produksi yang rendah, sehingga dapat menggantikan penggunaan energi fosil (Akasaka dkk., 2011).

Meskipun penggunaan energi hidrogen memiliki beberapa keunggulan, namun penggunaan teknologi hidrogen sebagai sumber energi pada sel bahan bakar kendaraan bermotor masih menyimpan masalah antara lain, keamanan dan kurangnya infrastruktur seperti produksi, distribusi, pengisian bahan bakar, dan, penyimpanan hidrogen (Principi, 2009; Sakintuna, 2007; dan Song, 2012). Salah satu hambatan terbesar untuk mewujudkan ekonomi hidrogen saat ini bukan mengenai produksi atau cara memanfaatkan hidrogen, akan tetapi cara yang lebih efektif dan aman dalam penyimpanan hidrogen (Thomas, 2007).

Beberapa metode yang digunakan untuk penyimpanan hidrogen meliputi tangki bertekanan tinggi, tangki hidrogen cair, gabungan kriogenik-terkompresi, logam hidrida, hidrida kimia, dan adsorpsi pada material berpori (Hwang, 2014; Sakintuna, 2007; Balat, 2008; dan Chen P, 2012). Hidrogen baik dalam bentuk gas maupun cair dapat disimpan hingga 50 L pada suatu tangki baja, namun proses penyimpanan membutuhkan tekanan tinggi antara 200 hingga 500 bar. Hal tersebut beresiko terjadi kebocoran, selain itu efisiensi energi yang dihasilkan tidak terlalu tinggi (Hirscher, 2009). Penyimpanan hidrogen dalam logam hidrida seperti  $MgH_2$ ,  $AlH_3$ , dan  $BH_3$  mampu menyerap hidrogen dengan mudah, namun sulit dilepaskan karena terjadi pembentukan ikatan kimia antara logam hidrida

dengan gas hidrogen (Sakintuna dkk., 2007 dan Oriňáková, 2011). Akibatnya, dibutuhkan suhu yang tinggi pada saat proses pelepasan hidrogen yang terserap. Selain itu, logam hidrida memiliki densitas besar, sehingga proses pelepasan hidrogen tidak berlangsung dengan mudah (Hirscher, 2009 dan Sakintuna dkk., 2007). Penyimpanan hidrogen dengan hidrida kimia memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dari logam hidrida, karena mengandung unsur-unsur yang lebih ringan seperti  $\text{LiBH}_4$ ,  $\text{NaBH}_4$ , dan  $\text{NH}_3\text{BH}_3$ . Namun pada penggunaan hidrida kimia ini masih membutuhkan regenerasi *off-board* dalam penyimpanan hidrogen (Hwang, 2014). Penyimpanan hidrogen dengan adsorpsi pada material berpori merupakan metode dengan proses yang *reversible*, densitas material rendah, dan pori yang dapat dimodifikasi (Xiao, 2009 dan Texier, 2004). Modifikasi pori adsorben harus memiliki ukuran yang sesuai dengan molekul hidrogen yaitu sebesar 0,29 nm (Weitkamp, 2009), adapun diameter pori optimal untuk menyerap hidrogen adalah 0,7 nm (Rzepka dkk., 1998). Kesesuaian ukuran pori merupakan faktor yang menentukan kapasitas adsorbat yang terserap, dan syarat yang harus dipenuhi dalam penggunaan metode ini. Berdasarkan perbandingan beberapa metode diatas, metode adsorpsi dengan material berpori merupakan metode penyimpanan hidrogen yang relatif aman dan efisien (Thomas, 2007 dan Broom, 2011).

Penelitian tentang penyimpanan hidrogen pada material berpori banyak dikembangkan menggunakan material zeolit dan karbon. Zeolit merupakan kristal aluminosilikat yang potensial sebagai bahan penyimpanan hidrogen, karena memiliki stabilitas termal dan kimia yang baik, struktur yang teratur, volume pori besar, dan porositas tinggi. Namun, zeolit memiliki luas permukaan yang relatif kecil, sehingga kapasitas adsorpsi hidrogen yang dihasilkan masih tergolong rendah (Turnbull, 2010 dan Broom, 2011). Disisi lain, karbon memiliki luas permukaan tinggi hingga  $3.000 \text{ m}^2/\text{g}$  (Strobel, 2006), meskipun struktur pori kurang teratur dan porositas relatif lebih rendah (Alam dan Mokaya, 2011). Zeolit mampu menyimpan gas hidrogen antara 0,08-4,5% berat pada kondisi suhu dan tekanan yang bervariasi (Langmi dkk., 2003; Arean dkk., 2007; Li dan Yang, 2006; Prasanth dkk., 2008; dan Chung, 2010), sedangkan karbon dengan luas permukaan hingga  $3.000 \text{ m}^2/\text{g}$  mampu menyimpan hidrogen sebesar 0,3-4,0%

berat pada kondisi suhu dan tekanan yang bervariasi (Xu dkk., 2007 dan Zubizareta dkk., 2009). Berdasarkan penelitian tersebut, maka dapat dilakukan modifikasi dengan menggabungkan keunggulan pada zeolit dan karbon untuk membentuk karbon tertemplat zeolit atau *Zeolite Templated Carbon* (ZTC).

Karbon tertemplat zeolit yang disintesis dengan templat zeolit-Y menunjukkan kapasitas penyimpanan hidrogen yang relatif besar. Adapun kapasitas penyimpanan hidrogen mengalami kenaikan yang tinggi pada kondisi  $-196^{\circ}\text{C}/20$  bar. Chen dkk., (2007) telah berhasil mensintesis karbon tertemplat zeolit-Y dengan luas permukaan dan volume mikropori tinggi sebesar  $2.117\text{ m}^2/\text{g}$  dan  $0,79\text{ cm}^3/\text{g}$  dengan prekursor propilena, serta  $2.456\text{ m}^2/\text{g}$  dan  $1,0528\text{ cm}^3/\text{g}$  dengan menggunakan prekursor butilena. Guan dkk., (2009) menggunakan templat zeolit- $\text{NH}_4\text{Y}$  dengan prekursor sukrosa, dimana hasil penelitian menunjukkan luas permukaan spesifik  $1.500\text{ m}^2/\text{g}$  dengan kapasitas penyimpanan hidrogen sebesar 2,4% berat pada kondisi  $77\text{K}/10$  bar. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, maka pada penelitian ini digunakan zeolit- $\text{NaY}$  sebagai templat untuk mensintesis karbon tertemplat zeolit dan sukrosa sebagai prekursor. Pemilihan sukrosa sebagai prekursor karbon disebabkan sukrosa memiliki *yield* karbon yang tinggi, ukuran molekul sesuai untuk dimasukkan dalam pori zeolit, dan memiliki kelarutan tertentu (Sevilla dkk, 2010). Selain itu ketersediaan yang banyak dan harga lebih terjangkau dibandingkan bahan karbon lain seperti propilena, butilena (Chen dkk., 2007), asetonitril (Yang dkk., 2006), dan furfural alkohol (Masika dkk., 2014 dan Konwar dkk., 2013). Disamping itu terdapat kelemahan pada material karbon tertemplat zeolit yaitu variasi porositas terbatas, sehingga perlu dilakukan modifikasi untuk menghasilkan ukuran pori yang optimal untuk adsorpsi hidrogen melalui proses aktivasi (Guan dkk., 2009).

Proses aktivasi bertujuan untuk membentuk saluran mikropori dari saluran mesopori yang telah terbentuk, sehingga dapat meningkatkan luas permukaan karbon tertemplat zeolit. Aktivasi terbagi atas aktivasi fisik dan aktivasi kimia. Aktivasi fisik dapat menggunakan gas pengoksidasi seperti  $\text{CO}_2$  dan uap air (Yang dkk., 2012), sedangkan aktivasi kimia dilakukan dengan zat yang dapat menghidrasi pada suhu tinggi seperti  $\text{KOH}$ , (Jiménez dkk., 2012),  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (Hayashi dkk., 2002),  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{FeCl}_3$  (Oliveira dkk., 2009; Kiliç dkk.,

2012) dan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (Lee, 2012). Aktivasi kimia memiliki beberapa keunggulan, diantaranya suhu proses aktivasi yang rendah, waktu aktivasi yang lebih singkat, dan porositas yang lebih tinggi (Wang dkk., 2009 dan Yang dkk., 2012). Adapun aktivasi kimia menggunakan KOH dan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  memiliki luas permukaan lebih tinggi dibandingkan  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dan NaOH (Kiliç dkk., 2012).

Sevilla dkk., (2010) menunjukkan bahwa aktivasi kimia karbon tertemplat zeolit-Y dengan KOH menghasilkan luas permukaan yang tinggi. Kisaran nilai luas permukaan meningkat hingga 84% dan volume pori meningkat dua kali lipat. KOH bereaksi dengan karbon pada suhu tinggi dengan menghasilkan  $\text{K}_2\text{CO}_3$ .  $\text{K}_2\text{CO}_3$  yang dihasilkan, kemudian direduksi oleh karbon membentuk atom kalium dan gas CO yang mampu terinterkalasi ke dalam lapis karbon menghasilkan pembentukan pori dengan ukuran sesuai jari-jari atom K, sehingga luas permukaan karbon meningkat. Atom kalium saat aktivasi memiliki peranan utama untuk membentuk pori berukuran mikro yang cocok digunakan sebagai penyimpan hidrogen. Akan tetapi penggunaan KOH melibatkan basa OH yang bersifat korosif. Oleh karena itu penggunaan KOH perlu digantikan dengan aktivator lain yang mengandung kalium.

Kiliç dkk. (2012) menggunakan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  sebagai aktivator pada karbon aktif dan hasil menunjukkan bahwa  $\text{K}_2\text{CO}_3$  berpotensi menghasilkan karbon dengan luas permukaan tinggi, yaitu  $2.613 \text{ m}^2/\text{gr}$ . Penelitian lain terkait aktivasi karbon tertemplat zeolit-NaY telah dilakukan oleh Anggarini (2013) dengan menggunakan aktivator  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya luas permukaan dan volume mikropori yang relatif tinggi dengan rasio optimum aktivator  $\text{K}_2\text{CO}_3$  untuk karbon tertemplat zeolit-NaY ialah 1,5, dimana pada rasio tersebut terjadi peningkatan penyimpanan hidrogen sebesar 2,87% berat pada kondisi suhu  $30^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Aktivasi dengan menggunakan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ini lebih baik dan aman bila dibandingkan dengan KOH, sebab hanya menghasilkan spesi aktif berupa kalium, gas CO, dan gas  $\text{CO}_2$  dalam jumlah yang relatif lebih sedikit. Penelitian tersebut masih belum memenuhi target penyimpanan hidrogen yang ditetapkan oleh *Department of Energy* (DoE) hingga tahun 2017 yaitu 5,5-7,5% berat (DoE,2009), sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan.

Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dari Anggarini (2013) yang telah berhasil mensintesis karbon tertemplat zeolit, dengan zeolit-Y sebagai templat dan sukrosa sebagai prekursor karbon. Pada penelitian Anggarini (2013) belum dilakukan optimasi pada proses adsorpsi yang memungkinkan untuk diperoleh hasil penyimpanan yang lebih tinggi. Pada penelitian ini akan difokuskan pada proses adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit yang telah dimodifikasi dengan  $K_2CO_3$ , dengan memperhatikan aspek tekanan operasi, suhu operasi, dan pengaruh waktu adsorpsi. Aspek tersebut didasarkan oleh adanya prasyarat yang ditetapkan oleh DoE dalam aplikasi penyimpan hidrogen antara lain tekanan operasi rendah 3-12 bar, suhu operasi dalam kisaran -40-105°C, kinetika cepat untuk adsorpsi atau desorpsi hidrogen (<1-2% massa/menit atau 2,5 menit), stabilitas termodinamika rendah (15-25 kJ.mol<sup>-1</sup>) (Guo dkk., 2008 dan Yang dkk., 2010). Beberapa pengukuran yang dilakukan meliputi pengukuran jumlah hidrogen terserap sebagai fungsi dari tekanan dengan menggunakan model isoterm adsorpsi, pengaruh suhu adsorpsi, entalpi adsorpsi, entropi adsorpsi, dan karakteristik adsorpsi (Thomas dkk., 2007).

Penelitian terkait isoterm adsorpsi telah banyak dilakukan dan menunjukkan hasil bahwa material berpori sebagai penyimpan hidrogen cenderung mengikuti pendekatan isoterm Langmuir, dimana penyerapan mengambil pada tempat spesifik yang homogen dalam adsorben dan distribusi yang seragam dari tempat adsorpsi energetik. Model Langmuir ini mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi pada lapisan *monolayer* (Panella dkk., 2005) dan jenis adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisik (Dong dkk., 2007). Berbeda dengan penelitian Saha dkk., (2008) yang menunjukkan adsorpsi terjadi pada lapisan *multilayer* yang sesuai dengan model isoterm Freundlich, selain itu hasil korelasi persamaan Freundlich sesuai untuk tekanan rendah. Model isoterm adsorpsi ini menentukan karakteristik permukaan, afinitas dari adsorben, dan kapasitas adsorpsi dari adsorben (Alberty, 1990).

Material berpori diketahui memiliki kinetika cepat dalam penyerapan dan pelepasan hidrogen (Palomino dkk., 2008; Hirscher, 2009; dan Yürüm, 2009). Hal ini terbukti pada penelitian Saha dkk., (2008), yang menunjukkan kinetika cepat pada kondisi 77 K/ 1 bar sebesar 0,0964 detik; kondisi 194,5 K/ 1 bar sebesar



0,2140 detik; dan kondisi 297 K/ 1 bar sebesar 0,3023 detik. Selain itu, Zhao dkk. (2005), juga menunjukkan pada kondisi 77 K/ 1 bar kinetika karbon aktivasi kurang dari 2 menit. Hal ini menunjukkan bahwa kinetika cepat pada material berpori sesuai dengan target DoE (Guo dkk.,2008 dan Yang dkk.,2008). Meskipun material berpori memiliki kinetika cepat dalam menyerap dan melepas hidrogen. namun masih terdapat hambatan yang signifikan yakni interaksi antara molekul hidrogen dengan dinding pori adsorben masih memiliki gaya *van der Waals* yang lemah. Hal ini berdampak pada energi interaksi atau entalpi adsorpsi yang dihasilkan rendah hanya sebesar 5-6 kJ.mol<sup>-1</sup> (Palomino dkk., 2008). Siklus penyimpanan dan pelepasan hidrogen harus memiliki entalpi adsorpsi yang tidak terlalu rendah agar mampu menyerap hidrogen dengan kapasitas besar, serta tidak terlalu tinggi untuk memfasilitasi proses pelepasan hidrogen (Hirscher, 2009).

Bhatia dan Myers (2006), menganalisa persyaratan termodinamika untuk adsorben dalam aplikasi penyimpanan hidrogen. Penelitian tersebut menunjukkan tekanan pengisian yang wajar pada 30 bar dan pelepasan hidrogen terjadi pada 1,5 bar secara *reversible*. Akibatnya, entalpi rata-rata optimum yang didapatkan sebesar 15 kJ.mol<sup>-1</sup> dan entropi rata-rata sebesar 66,5 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Pada material berpori (zeolit) entalpi adsorpsi hidrogen yang dihasilkan masih relatif rendah sebesar 6,5-15 kJ.mol<sup>-1</sup> (Arean dkk., 2003, 2005 dan Palomino dkk., 2008, 2009). Namun pada zeolit-(Mg,Na)-Y entalpi adsorpsi memiliki nilai yang lebih tinggi dari panas pencairan hidrogen sebesar 18 kJ.mol<sup>-1</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit-(Mg,Na)-Y potensial untuk digunakan sebagai material penyimpan hidrogen *reversible* (Arean dkk., 2007). Disamping itu, penelitian tersebut menunjukkan nilai entropi lebih rendah dari batas maksimum yang ditentukan (<160 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) (Garrone dkk., 2008). Meskipun zeolit tersebut memiliki nilai entalpi dan entropi yang sesuai, namun kapasitas adsorpsi yang dihasilkan belum memenuhi target DoE, hanya sebesar 3-4,5% berat. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan mengkaji studi adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit-Y dengan aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, agar dapat diketahui kemampuannya dalam menyerap hidrogen dengan pengaruh suhu, pengaruh waktu, dan tekanan. Dengan mengetahui hal tersebut, maka dapat diketahui juga kontribusi material karbon tertemplat zeolit-Y dalam aplikasi penyimpanan hidrogen.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan dalam penelitian ini adalah perlunya dilakukan optimasi suhu dan tekanan untuk adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit dalam aplikasi penyimpanan hidrogen. Kajian kinerja proses adsorpsi pada karbon tertemplat zeolit meliputi penentuan model isoterm adsorpsi, pengaruh waktu dan suhu terhadap kapasitas adsorpsi, serta aspek termodinamika adsorpsi.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan suhu dan tekanan optimum, serta adsorpsi hidrogen yang terjadi pada karbon tertemplat zeolit dengan modifikasi  $K_2CO_3$ .

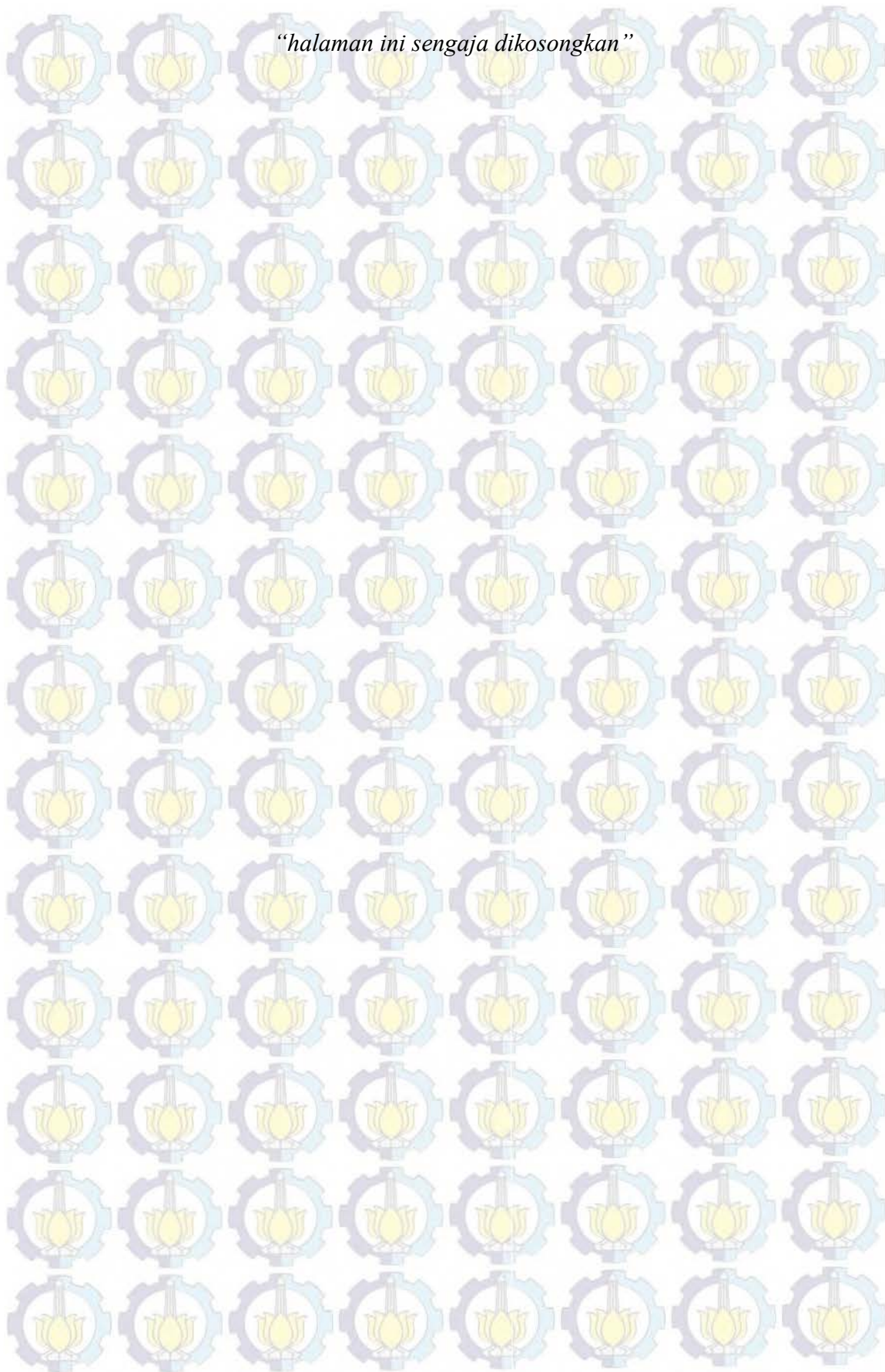
## **1.4 Batasan Penelitian**

Batasan dalam penelitian ini meliputi (i) aktivasi karbon tertemplat zeolit dengan  $K_2CO_3$  pada kondisi optimum sesuai dengan penelitian Anggarini (2013), (ii) suhu adsorpsi yang digunakan sebesar 30, 40 dan 50°C, (iii) tekanan adsorpsi yang digunakan sebesar 1; 1,5; 2 dan 3 bar, (iv) model isoterm adsorpsi yang dipelajari yaitu model Langmuir, Freundlich, Tempkin, dan Sips, serta (v) dilakukan pengukuran kapasitas penyimpan hidrogen secara gravimetri.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada optimasi kondisi adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit dengan modifikasi dengan  $K_2CO_3$ . Penelitian ini juga diharapkan mampu meningkatkan penggunaan material berpori sebagai material penyimpan hidrogen.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

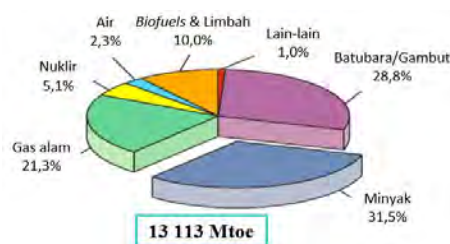


## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

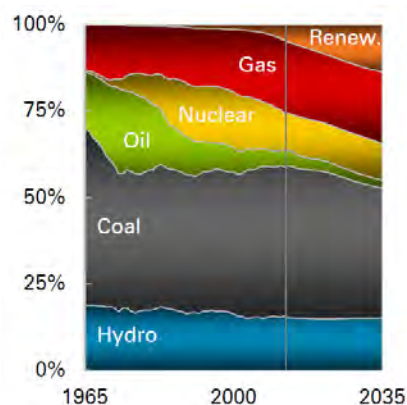
Peningkatan jumlah penduduk dunia berkisar 26,8-91,3 juta per tahun dengan angka rata-rata pertumbuhan penduduk tahunan untuk tahun 2000-2050 berkisar 0,40-1,12% atau 7,4-10,6 miliar jiwa menurut proyeksi *United Nations* (2004), besarnya angka pertumbuhan penduduk tersebut akan berdampak pada meningkatnya penggunaan energi. Selain angka populasi penduduk dunia yang kian bertambah, adanya peningkatan penggunaan energi juga dipengaruhi oleh pesatnya pertumbuhan ekonomi, pengembangan, dan pembangunan wilayah. Hal ini tentu berdampak pada pemenuhan energi di semua sektor, baik secara nasional ataupun internasional yang semakin besar. Akan tetapi tidak selamanya energi yang ada dapat mencukupi seluruh kebutuhan dalam jangka panjang. Cadangan energi dunia semakin menipis dan proses produksinya membutuhkan waktu hingga jutaan tahun.

Krisis energi merupakan salah satu permasalahan krusial yang tengah dihadapi berbagai negara di dunia termasuk Indonesia. Berdasarkan *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia*, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral memaparkan bahwa intensitas total konsumsi energi per kapita Indonesia tiap tahun hampir seluruhnya mengalami peningkatan dengan pertumbuhan rata-rata di atas 6,5% (PUSDATIN ESDM, 2012). Adapun prosentase bahan bakar minyak dan batu bara termasuk dalam sumber energi dengan konsumsi yang besar pada tiap negara di dunia jika dibandingkan dengan sumber energi lainnya, seperti pada Gambar 2.1 dimana penggunaan sumber energi tersebut berasal dari karbon (*International Energi Agency*, 2013).



Gambar 2.1 Prosentase sumber energi primer yang digunakan di dunia (*International Energi Agency*, 2013)

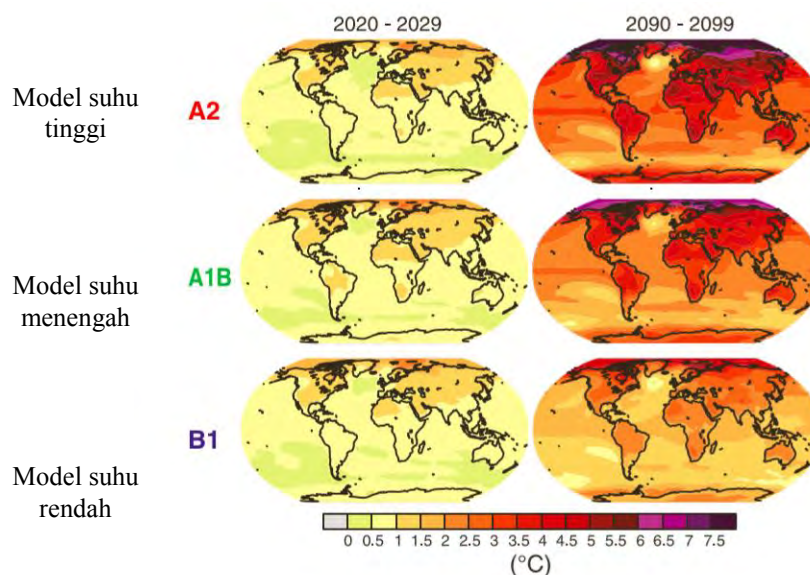
Data dari Departemen Energi AS tahun 2002 memprediksikan minyak bumi akan habis dalam kurun waktu 36,5 tahun, sedangkan menurut laporan mutakhir dari *Congressional Research Services* (CRS) pada tahun 1985 dan 2003 menyebutkan bahwa jika tidak ada perubahan pola pemakaian, cadangan minyak bumi hanya cukup untuk 30-50 tahun lagi (Prihandana dan Hendroko, 2008). Dengan mempertimbangkan terbatasnya persediaan minyak bumi, pemerintah Indonesia telah mengumumkan rencana untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar minyak dengan menerbitkan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar minyak (BP-PEN, 2006). Kebijakan tersebut menekankan pada sumber daya yang dapat diperbaharui atau energi terbarukan (*renewable energy*) sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Berdasarkan laporan dari British Petroleum (2014) bahwa sumber energi terbarukan diproyeksi akan mengalami peningkatan yang signifikan, hingga terjadi penurunan penggunaan energi berbasis minyak dan nuklir, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Proyeksi energi primer dunia (British Petroleum, 2014)

Selain itu efisiensi produksi energi dari proses pembakaran karbon untuk bahan bakar masih menimbulkan masalah dalam peningkatan jumlah karbondioksida yang memberikan kontribusi sangat besar pada efek rumah kaca. Hingga saat ini jumlah karbondioksida naik dengan laju sekitar 1 ppm per tahun (Shakhashiri, 2008). Emisi karbondioksida ini terus bertambah dan terakumulasi

hingga menyebabkan suhu udara global naik antara 1,5°C hingga 5,8°C. Adapun perubahan suhu permukaan untuk abad ke-21 diproyeksikan akan terus meningkat, dimana hampir semua wilayah mengalami pemanasan yang tinggi tidak terkecuali benua antartika yang dipastikan akan bersuhu hangat, seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Proyeksi model iklim dari pemanasan permukaan pada awal dan akhir abad ke-21 (WTO dan UNEP, 2009)

Apabila sumber energi terbarukan digunakan secara maksimal, maka dampak meningkatnya perubahan suhu dapat diatasi. Hal ini didukung dengan adanya perjanjian oleh negara-negara di dunia termasuk Indonesia untuk mengurangi atau membatasi emisi gas rumah kaca tersebut pada tahun 2020 dengan menjaga kenaikan suhu rata-rata global di bawah 1,5 atau 2°C (*United Nations Environment Programme*, 2013).

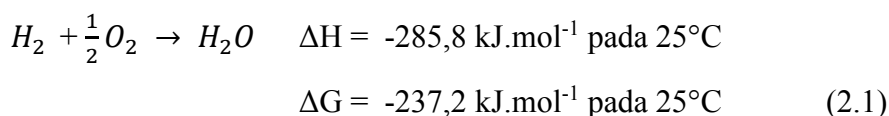
## 2.1 Hidrogen sebagai Sumber Energi

Hidrogen merupakan unsur ringan yang tidak berasa, tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak beracun pada konsentrasi sekitar 100 ppm atau 0,01% di udara (Lim dkk., 2010). Unsur hidrogen paling sederhana di alam semesta dimana hanya terdiri dari satu proton dan satu elektron, sehingga hidrogen bersifat reaktif dan mampu berikatan dengan unsur lain. Kelimpahan hidrogen cukup besar di alam,



banyak ditemukan dalam bentuk senyawa seperti hidrokarbon, molekul air (H<sub>2</sub>O), dan sedikit dalam bentuk molekul diatomiknya yaitu gas H<sub>2</sub>, (Momirlan, 2005 dan Sunardi, 2007). Hidrogen merupakan unsur pembentuk 75% massa material dan lebih dari 90% jumlah atom hidrogen sebagai penyusun material di alam semesta (Mariolakos dkk., 2007).

Energi hidrogen merupakan sistem energi non karbon yang potensial, yang mana memiliki potensi jangka panjang sebagai bahan bakar alternatif, sehingga mampu menggantikan bahan bakar fosil konvensional (Dutta, 2013). Hal ini dikarenakan hidrogen adalah sumber energi terbarukan yang bersih dan efisien, dimana pembakaran hidrogen dengan oksigen hanya menghasilkan uap air dan energi (Persamaan 2.1). Adapun molekul air hasil pembakaran hidrogen dapat diubah kembali menjadi gas hidrogen melalui proses elektrolisis atau fotokatalisis (Züttel dkk., 2010 dan Shasikala, 2012).



Berdasarkan persamaan diatas, diketahui bahwa polutan hasil pembakaran hidrogen sangat ramah lingkungan. Hal ini berbeda dengan bahan bakar fosil, dimana polutan yang dihasilkan antara lain CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, radioaktivitas, logam berat, dan abu, memiliki konsentrasi yang lebih besar dan lebih merusak daripada yang mungkin dihasilkan oleh sistem energi hidrogen terbarukan (Momirlan, 2005).

Selain dari polutan hasil pembakaran, hidrogen sebagai bahan bakar transportasi memiliki berbagai keunggulan dibandingkan bahan bakar fosil antara lain mudah terbakar, energi pengapian sangat rendah, memiliki rentang batas detonasi yang sangat luas, difusifitas tinggi, dan nyala api di udara sangat cepat. Adapun perbandingan sifat kimia dan fisik bahan bakar hidrogen, metana, dan bensin ditunjukkan dalam Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan sifat kimia dan fisik bahan bakar hidrogen, metana, dan bensin

Sifat Bahan Bakar	Hidrogen	Metana (H/C=4)	Bensin (H/C=1,87)
Berat molekul (g/mol)	2,016	16,04	~110
Rapat massa (kg/N <sub>m</sub> <sup>3</sup> ) pada P =1 atm = 0,101 MPa dan T=0°C	0,09	0,72	720-780 (cair)
Rapat massa hidrogen cair saat suhu 20K (kg/N <sub>m</sub> <sup>3</sup> )	70,9	-	-
Titik didih (K)	20,2	111,6	310-478
Nilai energi yang tinggi (MJ/kg), dengan asumsi produk yang dihasilkan ialah air)	142,0	55,5	47,3
Nilai energi yang rendah (MJ/kg), dengan asumsi produk yang dihasilkan ialah air)	120,0	50,0	44,0
Batas kemudahan terbakar (% volume)	4,0-75,0	5,3-15,0	1,0-7,6
Batas detonasi (% volume)	18,3-59,0	6,3-13,5	1,1-3,3
Kecepatan difusi di udara (m/s)	2,0	0,51	0,17
Energi pengapian (ml)			
- Pada campuran stoikiometri	0,02	0,29	0,24
- Pada batas mudah terbakar rendah	10	20	n/a
Kecepatan api di udara (cm/s)	265-325	37-45	37-43
Toksisitas	Tidak beracun	Tidak beracun	Beracun diatas 50 ppm

Sumber : Balat, Mustafa (2008) dan Ni dkk., (2006)

Keunggulan lain yang dimiliki bahan bakar hidrogen adalah kepadatan energi tinggi per satuan massa yakni 33,3 kWh/kg, dimana kandungan energi tersebut tiga kali lebih besar daripada bensin (Froudakis, 2011; Corbo dkk., 2011; dan Cipriani dkk.,2014). Hal ini berarti untuk mendapatkan besar energi yang sama dengan bensin, hanya dibutuhkan massa energi yang lebih sedikit. Rata-rata

dibutuhkan sekitar 3,1 kg hidrogen untuk menjalankan kendaraan hingga 500 km atau 300 mil (Bénard, 2001 dan Xu dkk., 2007).

Berdasarkan uraian diatas, maka hidrogen memegang janji sebagai bahan bakar masa depan yang bermanfaat dalam aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial (Balat, 2008). Aspek jangka panjang pada lingkungan yakni mampu menurunkan emisi karbon dari sektor transportasi. Aspek ekonomi yakni mengurangi ketergantungan pada minyak asing dimana saat ini penjualan hidrogen telah meningkat sebesar 6% per tahun dalam lima tahun terakhir, hal ini berkaitan erat dengan peningkatan penggunaan hidrogen di penyulingan minyak sebagai akibat dari standar ketat untuk kualitas bahan bakar (Kotay, 2008). Aspek sosial di bidang kesehatan, diketahui dari penelitian yang telah dilakukan Zweig (1994) bahwa efek polusi udara pada kesehatan manusia menggambarkan kerusakan paru-paru akibat pembakaran bahan bakar fosil, namun dengan penggunaan hidrogen untuk bahan bakar mampu menghasilkan perbaikan kesehatan fisik pada paru-paru manusia.

## **2.2 Penyimpanan Hidrogen**

Hidrogen bukan merupakan sumber energi primer yang ada di alam bebas, melainkan energi sekunder yang harus diproduksi. Hal ini menunjukkan bahwa hidrogen merupakan pembawa energi sama halnya dengan listrik, sehingga membutuhkan proses generasi, konversi, dan penyimpanan. Sebagian besar para ahli menganggap bahwa hidrogen memiliki peran besar sebagai pembawa energi penting di sektor energi masa depan (Turnbull, 2010).

Penggunaan teknologi hidrogen sebagai sumber energi pada sel bahan bakar kendaraan bermotor masih menyimpan problem yang harus diselesaikan. Tantangan utama dalam mengembangkan ekonomi hidrogen meliputi keamanan dan kurangnya infrastruktur seperti produksi, distribusi, pengisian bahan bakar, penyimpanan hidrogen, dan aplikasi hidrogen (Principi dkk., 2009; Sakintuna dkk., 2007; dan Song dkk., 2012). Adapun hambatan terbesar untuk mewujudkan ekonomi hidrogen saat ini bukan mengenai produksi atau cara memanfaatkan hidrogen, akan tetapi cara yang lebih efektif dan aman dalam penyimpanan hidrogen (Thomas, 2007).

Penyimpanan hidrogen merupakan prasyarat penting untuk aplikasi pada sel bahan bakar, khususnya dalam bidang transportasi (Ströbel dkk., 2006). Berbagai pertimbangan seperti produksi hidrogen dengan kemurnian tinggi, penyimpanan hidrogen dengan kepadatan dan efisiensi tinggi mutlak dikembangkan sebelum melakukan pemasaran teknologi hidrogen skala besar. Untuk mendapatkan hidrogen dengan kemurnian tinggi, maka berbagai proses pemisahan sangat berperan didalamnya antara lain elektrolisis, *steam reforming*, dekomposisi termal, oksidasi parsial, dan gasifikasi (Corbo, 2011 dan Dunker, 2006). Jika hidrogen murni telah dihasilkan, maka sistem penyimpanan hidrogen yang baik sangat diperlukan untuk mendukung keberhasilan teknologi sel bahan bakar hidrogen dalam aplikasi transportasi.

Penyimpanan hidrogen dapat diklasifikasikan menjadi penyimpanan fisik dan penyimpanan kimia. Metode penyimpanan fisik meliputi tangki bertekanan tinggi, tangki hidrogen cair, gabungan kriogenik-terkompresi, sedangkan untuk metode penyimpanan kimia meliputi hidrida logam, hidrida kimia, dan adsorpsi pada material berpori (Hwang, 2014; Sakintuna dkk., 2007; Balat, 2008; dan Chen P., 2012). Berikut merupakan penjelasan mengenai enam metode penyimpanan hidrogen.

**a. Tangki bertekanan tinggi**

Pada metode ini hidrogen disimpan dalam suatu silinder bertekanan tinggi, teknologi ini paling umum dan mudah digunakan untuk sel bahan bakar, karena alasan desain kendaraan, biaya, efisiensi, serta manfaat lingkungan (Ananthachar, 2005). Pertimbangan utama untuk tangki bertekanan tinggi adalah bahan penyusun tangki harus ringan, murah, dan cukup kuat untuk memenuhi spesifikasi tegangan, regangan, dan keamanan yang diperlukan (Song, 2003). Selain itu, konduktivitas termal material harus cukup tinggi untuk mengelola panas eksotermis selama mengisi tangki (Hwang, 2014). Akan tetapi kerugian yang dihasilkan antara lain kapasitas volumetri dan gravimetri rendah, energi kompresi tinggi, dan diperlukan pengelolaan panas selama pengisian (Hwang, 2014). Oleh karena itu, penyimpanan hidrogen dengan silinder bertekanan tinggi tidak mungkin digunakan, sebab beresiko mengalami kebocoran dan pada tekanan tinggi biaya yang dibutuhkan relatif mahal (Sakintuna dkk., 2007 dan Zhou, 2005).

#### **b. Tangki hidrogen cair**

Penyimpanan hidrogen dalam bentuk cair meningkatkan kapasitas volumetri pada tekanan rendah yaitu dari 24 atau 40 g/L (untuk hidrogen terkompresi pada tekanan 350 atau 700 bar dan suhu 300K) menjadi 70 g/L (untuk hidrogen cair pada tekanan 1 atm dan suhu 20K) (Hwang, 2014). Namun pada proses pencairan hidrogen dari fasa gas ke fasa cair dari suhu ruang membutuhkan energi besar 15,2 kWh/kg atau sekitar 30-35% dari nilai energi hidrogen (Durbin, 2013). Selain itu hidrogen cair hanya dapat disimpan dalam sistem terbuka, akan tetapi jika disimpan dalam sistem tertutup membutuhkan tekanan hingga 1.000 MPa pada suhu ruang (Zhou, 2005).

Meskipun kepadatan volumetri meningkat, namun penyimpanan dengan sistem ini tidak dapat digunakan karena beberapa alasan antara lain adanya *boil-off*, dimana hidrogen cair dapat menguap bahkan dengan tangki yang sangat terisolasi atau tertutup, sehingga menyebabkan hilangnya gas hidrogen pada suhu ruang (Kalanidhi, 1988). Terlepas dari biaya dan efisiensi energi akibat kehilangan hidrogen, *boil-off* juga mampu menimbulkan masalah keamanan. Oleh karena itu, meskipun perbaikan lebih lanjut dilakukan pada tangki hidrogen cair tetap saja penyimpanan ini tidak memenuhi persyaratan DoE.

#### **c. Tangki hidrogen kriogenik-tekanan tinggi**

Metode penyimpanan tangki hidrogen kriogenik-tekanan tinggi ini merupakan gabungan dari dua penyimpanan fisik yang telah dijelaskan sebelumnya. Penyimpanan dengan tangki bertekanan tinggi membutuhkan volume yang relatif besar, sementara itu penyimpanan dengan tangki hidrogen cair dapat menguap sehingga menyebabkan hilangnya hidrogen serta beresiko dalam keamanan. Upaya untuk mengatasi kelemahan dalam dua sistem tersebut, telah dilakukan studi penyimpanan fisik hidrogen yang mengarah pada penggabungan sistem (Ahluwalia dkk., 2010). Melalui metode ini, kepadatan volumetri dapat ditingkatkan dengan melakukan penekanan pada hidrogen cair pada suhu 20 K dari 70g/L pada 1 bar menjadi 87 g/L pada 240 bar, yang dapat mengurangi kerugian dalam penguapan hidrogen. Adapun prototipe peneliti di *Lawrence Livermore National Laboratory* menunjukkan bahwa tangki hidrogen kriogenik-bertekanan tinggi memungkinkan jarak tempuh kendaraan hingga 660 mil

menggunakan tangki tunggal dan tidak didapatkan kerugian dalam hal penguapan hidrogen. Hal ini juga diperkirakan pada suhu 20K dan tekanan 276 bar, metode ini mampu menghasilkan penyimpanan gravimetri sebesar 5,8% berat dan volumetri sebesar 43 g/L, nilai tersebut melebihi target DoE untuk tahun 2017.

**d. Logam hidrida**

Penyimpanan hidrogen dengan logam hidrida merupakan penyimpanan kimia, dimana hidrogen disimpan dalam bentuk senyawa kimia yang lebih aman (Oriňáková, 2011). Beberapa logam hidrida berpotensi *reversible* untuk penyimpanan hidrogen *on-board*, serta dapat melepaskan hidrogen pada suhu dan tekanan rendah untuk aplikasi sel bahan bakar (BACAS, 2006). Hidrida logam memiliki kepadatan penyimpanan hidrogen lebih tinggi daripada tangki bertekanan tinggi dan tangki hidrogen cair (Granovskii dkk., 2007), namun kapasitas gravimetri dan volumetri rendah, biaya tinggi, serta membutuhkan suhu tinggi untuk melepaskan hidrogen (Derwent dkk., 2006 dan Hwang 2014).

**e. Hidrida kimia**

Penyimpanan hidrogen dengan hidrida kimia ini memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dari hidrida logam, karena mengandung unsur-unsur yang lebih ringan seperti  $\text{LiBH}_4$ ,  $\text{NaBH}_4$ , dan  $\text{NH}_3\text{BH}_3$ . Metode ini memiliki kapasitas volumetri yang baik dan suhu operasi yang tepat, namun masih membutuhkan regenerasi *off-board* dalam penyimpanan hidrogen hal ini berbeda dengan kelima metode penyimpanan yang lain (Hwang, 2014).

**f. Adsorpsi pada material berpori**

Penyimpanan hidrogen dengan adsorpsi pada material berpori merupakan metode yang efektif untuk aplikasi sel bahan bakar kendaraan. Penyimpanan hidrogen dengan adsorpsi ini melalui mekanisme interaksi fisisorpsi, dimana molekul hidrogen terikat lemah dengan material penyimpan hidrogen. Penyimpanan hidrogen dengan fisisorpsi tergolong aman dan *reversible* (Xiao, 2009), selain itu sifat material berpori dapat dioptimalkan misalnya modifikasi ukuran pori, volume pori, dan luas permukaan (Hwang, 2014). Oleh karena itu metode adsorpsi pada material berpori memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut.



Pada metode penyimpanan hidrogen dengan adsorpsi fisis, material berpori sangat tepat untuk digunakan sebagai adsorben. Hal ini dikarenakan material berpori memiliki densitas rendah, ukuran pori kecil, luas permukaan dan volume pori tinggi. Adapun kapasitas penyimpanan hidrogen sebanding dengan luas permukaan material berpori dan volume pori (Texier, 2004). Berbagai material berpori telah diteliti dan banyak mengalami modifikasi struktur permukaan, material berpori tersebut antara lain zeolit, karbon aktif, karbon *nanotube*, dan MOF (Blanco dkk., 2012; Thomas, 2007; dan Züttel 2003).

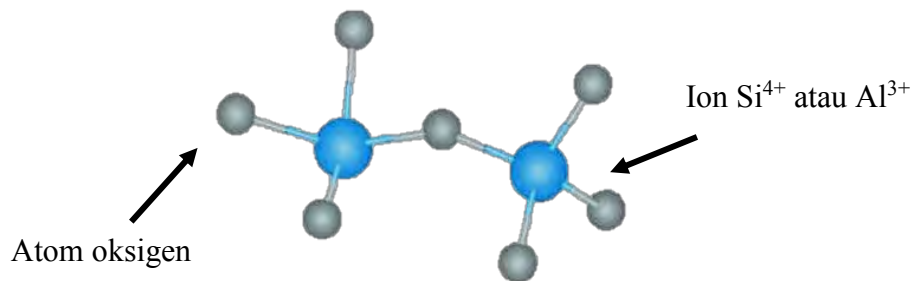
Berdasarkan keunggulan dan kelemahan pada enam metode tersebut, maka penyimpanan hidrogen yang aman dan efisien sebagai prasyarat untuk aplikasi transportasi adalah metode adsorpsi dengan material berpori (Thomas, 2007 dan Broom, 2011). Pengukuran pada kapasitas penyimpanan sebagai fungsi dari tekanan, ketergantungan suhu adsorpsi, entalpi adsorpsi, karakteristik adsorpsi-desorpsi, dilakukan guna mengoptimalkan material adsorben untuk mencapai target yang ditetapkan oleh *Department of Energy* (DoE) tahun 2017 hingga 5,5% berat dan 40 g/L volume (Hwang, 2014).

### **2.3 Material Berpori**

Material berpori berdasarkan porositasnya terbagi atas mikropori ( $< 2,0$  nm), mesopori (2,0-50 nm) dan makropori ( $> 50$  nm). Untuk menyimpan hidrogen dibutuhkan material berpori yang sesuai dengan ukuran molekul hidrogen sebesar 0,29 nm (Weitkamp, 2009). Penelitian Jinxiang dkk., (2007) menyebutkan bahwa ukuran pori rangka adsorben yang dekat dengan diameter molekul hidrogen merupakan faktor yang menentukan kapasitas adsorbat yang terserap. Penelitian Jinxiang dkk., (2007); Takagi dkk., (2004); dan De la Casa (2002), menjelaskan bahwa material mikropori memiliki kapasitas penyimpanan hidrogen lebih besar daripada mesopori. Menurut Rzepka dkk., (1998), diameter pori optimal untuk menyerap hidrogen adalah 0,7 nm yang sesuai untuk menyerap dua lapisan hidrogen. Zeolit dan karbon merupakan material yang dapat menyimpan hidrogen dalam kapasitas besar, selain itu material dapat dimodifikasi sesuai aplikasi yang diinginkan (Agarwal dkk., 1987, Chahine, 1994; Takagi dkk., 2004; Beneyto dkk., 2008; Broom, 2011; dan Guan dkk., 2009).

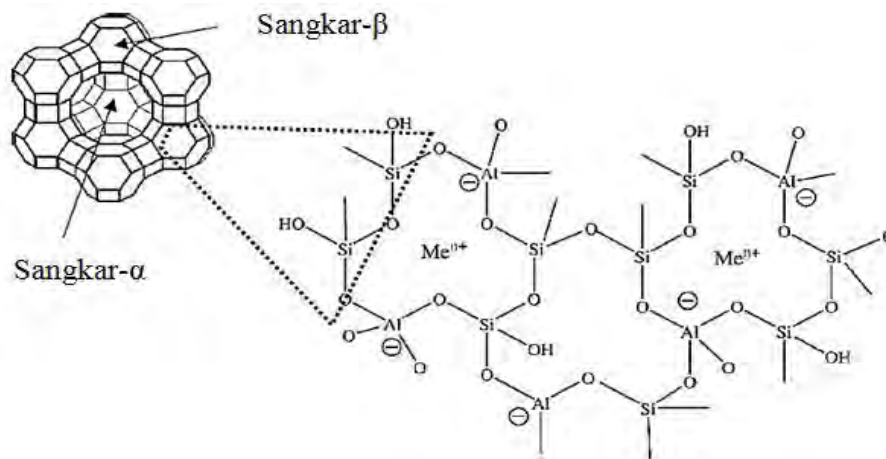
### 2.3.1 Zeolit

Zeolit merupakan kristal aluminosilikat terhidrasi yang tersusun atas satuan-satuan tetrahedral ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup> dan ( $\text{AlO}_4$ )<sup>5-</sup> dengan satu atom oksigen sebagai penghubung antara atom silikon dan aluminium yang membentuk kerangka tiga dimensi (Weitkamp, 2009), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Rumus umum untuk zeolit aluminosilikat adalah  $\text{M}_{x/z}[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot m\text{H}_2\text{O}$ , dimana  $m$  merupakan jumlah valensi kation  $M$  untuk menetralkan muatan negatif pada kerangka aluminosilikat (Hirscher, 2009).



Gambar 2.4 Satuan dasar penyusun zeolit yang tersusun dari tetrahedral  $\text{SiO}_4$  dan  $\text{AlO}_4$  dengan atom oksigen sebagai penghubung atau jembatan (Smart and Moore, 2005)

Pada kerangka tiga dimensi diatas, atom silikon yang memiliki muatan 4+ dapat digantikan oleh atom aluminium dengan muatan 3+, sehingga menghasilkan struktur bermuatan negatif yang berasal dari perbedaan muatan antara tetrahedral ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup> dan ( $\text{AlO}_4$ )<sup>5-</sup>. Muatan negatif inilah yang menyebabkan zeolit mampu mengikat kation. Kation yang diikat oleh zeolit biasanya kation alkali dan alkali tanah, atau dapat digantikan dengan kation lainnya melalui pertukaran ion (Valdés dkk., 2006). Adapun kation berfungsi sebagai pusat penyeimbang muatan untuk menjaga kenetralan muatan zeolit (Smart and Moore, 1993). Kerangka tiga dimensi ini juga menghasilkan rongga-rongga yang saling berhubungan ke segala arah (Gambar 2.5).



Gambar 2.5 Struktur kerangka zeolit pada dua dimensi dan tiga dimensi (Valdés dkk., 2006 dan Foo, 2011)

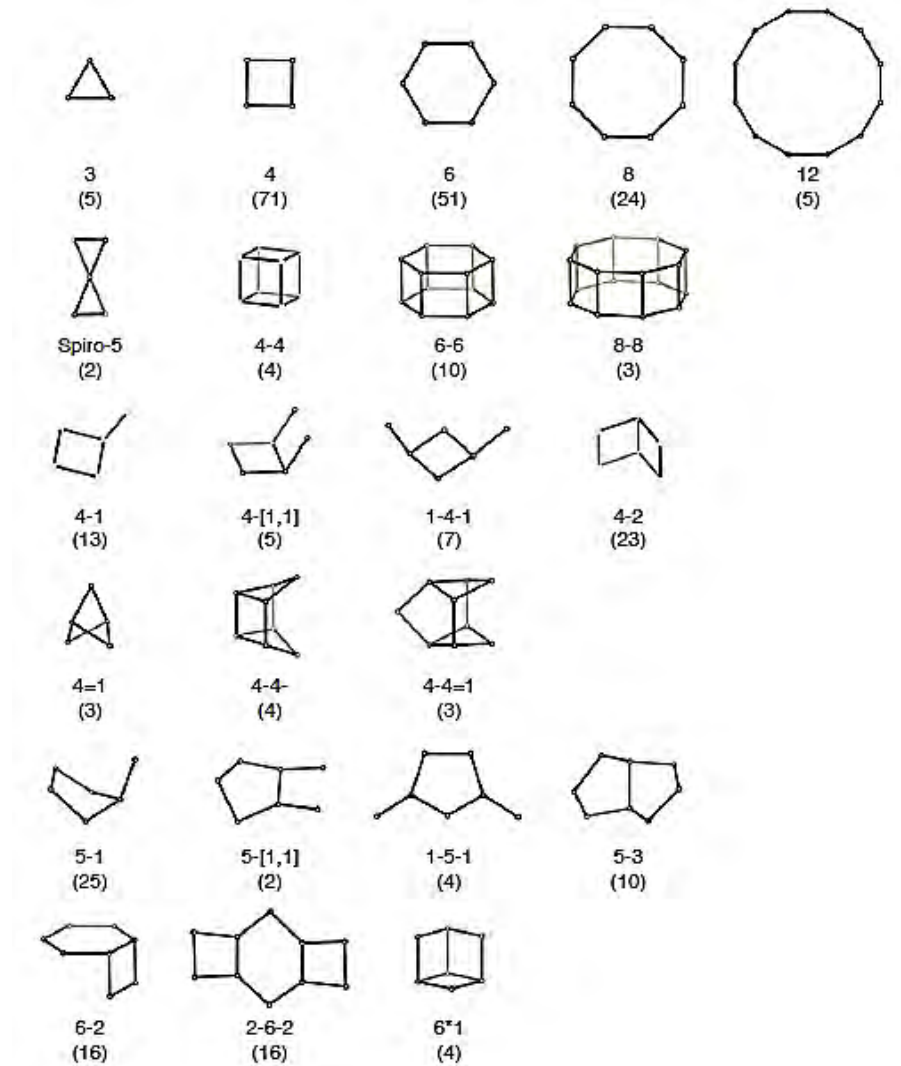
Morfologi dan struktur kristal yang terdiri dari rongga-rongga yang terhubung ke segala arah menyebabkan permukaan zeolit menjadi luas. Sebagai contoh, struktur kerangka terbuka yang terjadi memungkinkan zeolit untuk melakukan adsorpsi satu kation  $\text{Ca}^{2+}$  bertukar dengan dua kation  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  atau gabungan dari keduanya (Breck, 1974).

Zeolit berdasarkan proses terbentuknya terdiri atas zeolit alam dan zeolit sintetis. Zeolit secara alami terbentuk melalui proses perubahan alam terhadap batuan vulkanik, yang terdiri atas silikon oksida dan sejumlah kecil alumina. Komposisi kimia zeolit bergantung pada kondisi hidrotermal, seperti suhu, tekanan uap air, dan komposisi air tanah di lokasi pembentukannya. Sedangkan zeolit sintetis merupakan zeolit hasil rekayasa manusia melalui proses kimia, sehingga diperoleh karakter yang serupa dengan mineral zeolit alam. Zeolit sintetis meskipun tidak sama persis dengan zeolit alam, namun umumnya mempunyai sifat fisis yang jauh lebih baik daripada zeolit alam (Saputra, 2006).

Berdasarkan struktur pembentuknya, kerangka zeolit terbagi menjadi tiga bagian yaitu :

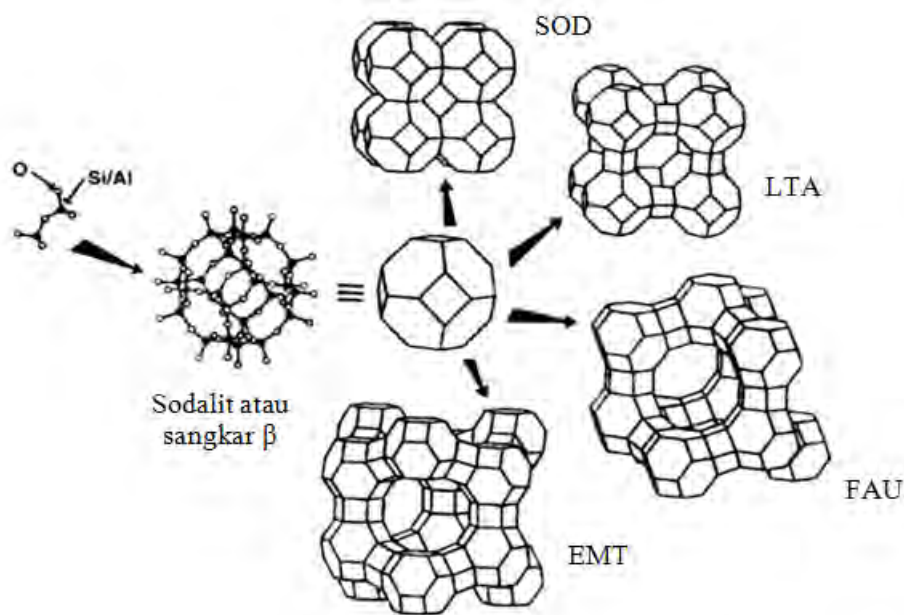
1. Unit bangun primer (*Primary Building Unit* atau PBU), merupakan struktur tetrahedral Si dan Al yang menghubungkan keempat atom O untuk membentuk kerangka tiga dimensi, dimana setiap oksigen membatasi dua tetrahedral, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4.

2. Unit bangun sekunder (*Secondary Building Unit* atau SBU), merupakan gabungan antara dua atau lebih unit bangun primer yang saling terhubung sehingga dapat membentuk lapisan tunggal atau rantai cincin, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Struktur Unit Bangun Sekunder (Baerlocher dkk., 2007)

3. Bangun Polihedral, merupakan gabungan dari unit bangun sekunder, sehingga dapat membangun struktur baru yang akan menghasilkan berbagai kerangka zeolit. Setiap bangunan baru mempunyai ukuran pori yang berbeda, bergantung pada unit bangun sekunder yang bergabung (Baerlocher dkk., 2007 dan Hirscher, 2009).



Gambar 2.7 Sodalit atau sangkar  $\beta$ , dirangkai untuk membentuk struktur zeolit-A, zeolit-Y, dan zeolit-EMT (Auerbach dkk., 2003)

Zeolit memiliki kerangka yang bervariasi mulai unit bangun primer, unit bangun sekunder hingga membentuk bangun polihedral, hal ini menjadikan ukuran pori yang dihasilkan juga bervariasi. Adapun struktur pori dengan luas permukaan tinggi berguna untuk penyimpanan hidrogen dengan interaksi fisisorpsi. Menurut Langmi dkk. (2003), zeolit mampu menyerap hidrogen dalam kapasitas tinggi melalui proses fisisorpsi yang *reversible* pada suhu dan tekanan rendah. Sedangkan menurut Turnbull (2010), salah satu keuntungan potensial yang dimiliki zeolit sebagai bahan penyimpanan hidrogen adalah stabilitas termal dan kimia yang baik. Hal ini ditunjukkan dengan kurangnya sifat mudah terbakar baik di udara maupun dalam suasana hidrogen.

Zeolit telah diteliti selama beberapa tahun untuk diaplikasikan sebagai material penyimpanan hidrogen. Pada tahun 1995, Weitkamp menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan hidrogen dalam zeolit yang berbeda pada suhu kamar kurang dari 0,1% berat. Namun, pada 77 K serapan hidrogen dapat ditingkatkan, sehingga kapasitas penyimpanan maksimum pada 15 bar untuk zeolit-CaX sebesar 2,19% berat (Harris dkk., 2005). Penggunaan model atomistik untuk hidrogen *packing* dalam *micropores* zeolit, menjelaskan bahwa kapasitas penyimpanan hidrogen dalam kerangka zeolit secara teoritis sebesar 2,86% berat

(Vitillo dkk., 2005). Hasil teoritis tersebut diperoleh di bawah kondisi fisik yang ekstrim yaitu, tekanan tinggi atau suhu yang sangat rendah, adapun nilai maksimum yang diperoleh sebenarnya bisa lebih rendah.

Berdasarkan kapasitas penyimpanan tersebut, nilai yang diperoleh masih terlalu rendah untuk aplikasi penyimpanan hidrogen. Akan tetapi, zeolit menarik untuk penyimpanan dengan cara adsorpsi, hal ini dikarenakan zeolit memiliki gaya elektrostatis yang kuat pada kerangkanya, dimana berasal dari penukaran kation (Hirscher, 2009). Oleh karena itu, pemahaman tentang interaksi antara zeolit dan molekul hidrogen dapat memungkinkan pengembangan atau penggabungan dengan material tertentu, sehingga dihasilkan material baru yang memiliki pusat polarisasi yang kuat untuk penyimpanan hidrogen dengan adsorpsi melalui mekanisme interaksi fisisorpsi.

Hingga saat ini berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan struktur zeolit agar diperoleh peningkatan kapasitas penyimpanan hidrogen yang tinggi. Berikut ini merupakan beberapa penelitian yang menggunakan zeolit dengan berbagai jenis untuk diaplikasikan sebagai material penyimpan hidrogen, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa jenis zeolit

No.	Jenis sampel zeolit	Kondisi Penyimpanan Hidrogen		Kapasitas Penyimpanan Hidrogen (% berat)	Pustaka
		T (°C)	P (bar)		
1	NaA (LTA)	-196	15	1,54	Langmi dkk., (2003)
	NaX (FAU)			1,79	
	NaY (FAU)			1,81	
	RHO			0,08	
2	Li-LSX (FAU)	-196	1,01	1,50	Li dan Yang, (2006)
	Na-LSX (FAU)			1,46	
	K-LSX (FAU)			1,33	
3	Na – LEV	-196	16	2,07	Dong dkk., (2007)
	H – OFF			1,75	
	Na – MAZ			1,64	
	Li – ABW			1,02	
4	Zeolit-(Mg-Na)Y	-196	1,01	3-4,5	Areán dkk., (2007)

5	NaX	-196	1	1,70	Prasanth dkk., (2008)
		30	5	0,11	
		60	5	0,36	
	NiNaX-49	-196	1	1,32	
		30	5	0,12	
		60	5	0,42	
	RhNaX-29	-196	1	1,17	
		30	5	0,40	
		60	5	0,52	
6	Zeolit-Y	-243	60	0,9	Li, dan Wu, (2009)
		-238		0,68	
		-233		0,45	
7	Zeolit-RWY	27	10.000	6,32	Rahmati, (2009)
8	Zeolit mordenit - MOR	30	50	0,25	Chung, (2010)
	ZSM-5 (MFI)	30	50	0,20	
	Zeolit-Y (USY)	30	50	0,40	
9	ZIF-8	-196	100	5,00	Assfour dkk., (2011)
			1	2,50	
		27	100	0,75	
			1	< 0,1	
10	ZIF-70	298	100	0,74	Han dkk., (2011)
	Li-ZIF-70			3,08	
	Na-ZIF-70			2,19	
	K-ZIF-70			1,62	
11	Zeolit-RHO	-193	1000	< 0,7	Liu dkk., (2012)
	Zeolit-ZON	0		1,8	
		25		1,6	
		77		1,4	
	Zeolit-CHA	0		0,8	
		25		0,9	
		77		1,0	
12	ZSM-5	-196	0,99	0,604	Fujiwara dkk., (2014)
	ZSM-5-I			0,360	
	ZSM-5-H			0,086	

### 2.3.2 Karbon

Karbon terdapat di alam dalam empat allotrop yang meliputi intan, grafit, *amorf*, dan *buckminsterfullerene* (C<sub>60</sub>). Berbagai allotrop tersebut memiliki struktur kimia, sifat fisika, dan karakteristik yang berbeda (Encarta Online, 2001 dan Sunardi, 2007). Allotrop karbon yang paling dikenal adalah intan dan grafit, dimana keduanya tidak memiliki pori (Hirscher, 2009). Akan tetapi material karbon juga dapat ditemukan dalam bentuk karbon berpori dengan struktur berbentuk heksagonal seperti benzena dengan hibridisasi sp<sup>2</sup>. Pada prinsipnya, material karbon berpori terbagi menjadi dua, yakni material karbon berpori yang memiliki rantai karbon heksagonal dengan rentang panjang seperti karbon *nanotube* dan karbon *nanofibers*, serta material karbon berpori yang memiliki struktur yang tidak teratur adalah karbon aktif (Hirscher, 2009).

Karbon memiliki kepadatan rendah, bentuk struktur yang bermacam-macam, struktur pori yang luas, dan stabilitas kimia yang baik (Hirscher, 2009). Karbon memiliki kemampuan untuk memodifikasi struktur menggunakan berbagai preparasi, aktivasi baik aktivasi fisika atau aktivasi kimia, serta menggunakan templat karbonisasi dengan melibatkan bahan anorganik berpori (Thomas, 2007 dan Hirscher, 2009). Berdasarkan sifat material karbon tersebut terutama kepadatannya yang rendah, maka bahan karbon berpotensi sebagai material penyimpan hidrogen (Xu dkk., 2007). Adapun berbagai karbon yang telah diteliti dan dikembangkan sebagai penyimpan hidrogen adalah *nanotube*, *nanohorns*, *nanofiber*, dan karbon aktif (Thomas, 2007).

Karbon aktif adalah karbon sintetik yang diaktifkan dengan menggunakan reagen seperti KOH atau NaOH untuk meningkatkan luas permukaan dan porositas, baik melalui aktivasi fisika atau aktivasi kimia, sehingga memiliki kemampuan mengadsorpsi hidrogen dengan baik (Ströbel dkk., 2006, Hirscher, 2009). Material karbon setelah diaktivasi memiliki diameter pori ±1nm dengan luas permukaan hingga 3000 m<sup>2</sup>/g dimana sebelumnya hanya memiliki luas permukaan spesifik 300-600 m<sup>2</sup>/g (Ströbel dkk., 2006). Adanya peningkatan luas permukaan tersebut mampu meningkatkan kapasitas penyimpanan hidrogen (Panella dkk., 2005 dan Xu dkk., 2007). Pada Tabel 2.3 ditunjukkan kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa material karbon.



Tabel 2.3. Kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa material karbon

No.	Jenis sampel karbon	Kondisi Penyimpanan Hidrogen		Kapasitas Penyimpanan Hidrogen (% berat)	Pustaka
		T (°C)	P (bar)		
1	Karbon aktif	30	100	< 0,67	Xu dkk., (2007)
		-196		6,0	
	SWNT	30		< 0,5	
		-196		< 4,0	
	SWNH	30		< 0,55	
		-196		4,0	
	GNF	30		< 0,3	
2	Karbon aktivasi KOH (AC)	-196	40	< 6,0	Beneyto dkk., (2008)
	Karbon aktivasi monolith (AC + binder polimer dari WSC ( <i>Waterlink Sutcliffe Carbon</i> ))			> 6,0	
3	Karbon aktif	25	95	2,8	Zubizarreta dkk., (2009)
	CNT			1,2	
	MWCNT			0,5	
	SWCNT			0,3	
	Karbon <i>nanosphere</i> di doping Nikel			0,45	
4	Karbon aktivasi KOH dengan rasio : a. KOH/AC = 3:1	-196	1	2,23	Wang dkk., (2009)
	b. KOH/AC = 5:1		20	5,63	
			1	2,49	
			20	7,08	
	Karbon Aktivasi CO <sub>2</sub>		1	1,70	
5	MWCNT-95%	25	1,01	0,22	Gerasimos dan Xenophon., (2010)
		-196		2,29	
	SWCNT-85%	25		0,36	
		-196		3,27	
6	AC <i>Polythiophene</i> dengan KOH (rasio KOH/PTh =2) pada suhu bervariasi :				Sevilla dkk., (2011)
	ACT-600	-196	20	4,55	
	ACT-700			4,80	
	ACT-750			5,19	
	ACT-800			5,40	
	ACT-850			5,71	
7	Karbon aktivasi KOH	25	1,01	0,6	Akasaka dkk., (2011)
		-196		4,0	

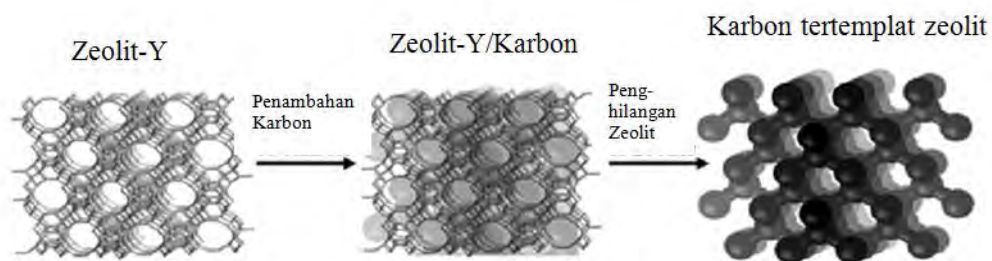
8	Karbon aktivasi KOH dengan variasi berat dan suhu aktivasi (Titik pusat T=1023K dan W=3,0) :			Zhao dkk., (2011)	
	AC-1/ T=1023; W=4,4	-196	80		6,6
	AC-2/ T=1023; W=1,6				3,9
	AC-3/ T= 988; W=3,0				6,2
	AC-5/ T=1023; W=3,0				5,9
	AC-7/ T=1058; W=3,0				6,1
9	Karbon <i>amorf</i>	-196	10	1,98	Jiménez dkk., (2012)
		26	10	0,05	
			50	0,94	
	AC-Karbon <i>amorf</i>	-196	10	3,98	
		26	10	0,10	
			50	1,13	
	Fishbone CNFs	-196	10	0,34	
		26	10	0,03	
			50	0,30	
	AC-Fishbone CNFs	-196	10	1,00	
		26	10	0,04	
			50	0,68	
	Platelet CNFs	-196	10	0,49	
		26	10	0,03	
			50	0,34	
	AC-Platelet CNFs	-196	10	2,22	
		26	10	0,05	
			50	1,07	
	Ribbon CNFs	-196	10	0,11	
		26	10	0,02	
			50	0,24	
	AC-Ribbon CNFs	-196	10	0,51	
		26	10	0,03	
			50	0,40	
10	Karbon aktivasi KOH di doping Nitrogen (urea) dengan perbandingan rasio berat :			Zhao dkk., (2013)	
	AC-250	-196	80		5,4
	AC-251				4,4-5,4
	AC-300				6,0
	AC-301				4,4-5,4
	AC-302				4,4-5,4
	AC-340				6,5
	AC-341				4,4-5,4
11	MWCNT-97,46%	25	100	< 0,2	Barghi dkk., (2014)
12	AC+cokes	30	120	0,496	Minoda dkk., (2014)
	AC Coke-Li			0,501	
	PAN			0,599	
	PAN-Li			0,592	

## 2.4 Karbon Tertemplat Zeolit sebagai Material Penyimpan Hidrogen

Material yang digunakan sebagai penyimpan hidrogen harus memiliki luas permukaan tinggi, porositas tinggi, dan interaksi yang kuat, agar didapatkan kapasitas penyimpanan hidrogen yang relatif tinggi (Froudakis, 2011). Kedua material yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya yakni zeolit dan karbon, merupakan material yang memiliki berbagai keunggulan dan kelemahan. Namun kedua material tersebut mampu mengatasi masalah dalam aplikasi penyimpanan hidrogen dalam padatan berpori (Nishihara, 2009).

Zeolit merupakan material berpori yang memiliki keunggulan dengan struktur yang teratur, volume pori besar, dan porositas tinggi, akan tetapi memiliki luas permukaan yang relatif kecil (Turnbul, 2010 dan Broom, 2011). Sedangkan karbon memiliki luas permukaan tinggi, meskipun struktur pori kurang teratur dan porositas relatif lebih rendah (Alam dan Mokaya, 2011). Berdasarkan hal tersebut, maka dapat dilakukan modifikasi dengan menggabungkan keunggulan pada zeolit dan karbon untuk membentuk karbon tertemplat zeolit atau *Zeolite Templated Carbon (ZTC)*.

Karbon tertemplat zeolit merupakan material karbon yang dibuat dari prekursor karbon dengan zeolit sebagai templat atau cetakan. Kyotani dkk. (2001), menggambarkan fabrikasi khas karbon tertemplat zeolit, dimana diawali dengan cara membakar prekursor karbon dan zeolit secara bersama-sama pada suhu tinggi. Kemudian dilakukan polimerisasi, yang diikuti oleh karbonisasi prekursor karbon. Setelah proses karbonisasi, komposit karbon/zeolit yang dihasilkan dicuci berturut-turut dengan asam kuat, seperti asam klorida (Yang dkk., 2012). Adanya penghapusan templat ini diharapkan menghasilkan pembentukan karbon mikro yang memiliki ukuran pori sebanding dengan ketebalan dari dinding kerangka templat yang digunakan (Konwar, 2013), dimana ketebalan dinding zeolit biasanya kurang dari 1 nm (Xia dkk., 2013). Sehingga dengan sintesis karbon tertemplat zeolit tersebut akan didapatkan material berpori yang memiliki luas permukaan tinggi dengan volume pori dan porositas tinggi untuk aplikasi penyimpanan hidrogen (Nishihara, 2009 dan Alam, 2011).



Gambar 2.8. Skema menjelaskan keseluruhan templat prosedur sintesis untuk karbon berpori menggunakan templat zeolit-Y (Lee dkk., 2006).

Struktur karbon tertemplat zeolit dapat dikontrol melalui beberapa parameter antara lain pemilihan jenis templat, prekursor karbon, kondisi karbonisasi (Konwar, 2013 dan Guan dkk., 2009). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mensintesis karbon tertemplat zeolit dengan prekursor karbon dan jenis zeolit yang berbeda-beda untuk diaplikasikan dalam penyimpanan hidrogen. Adapun kapasitas penyimpanan hidrogen yang dihasilkan bervariasi, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4. Kapasitas penyimpanan hidrogen pada beberapa material karbon tertemplat zeolit

No.	Jenis sampel karbon tertemplat zeolit	Kondisi Penyimpanan Hidrogen		Kapasitas Penyimpanan Hidrogen (% berat)	Pustaka
		T (°C)	P (bar)		
1	Sukrosa/Zeolit-Y	26	1	0,64	Anggarini (2013)
2	Propilen/Zeolit-NaY	-196	1	1,4	Armandi dkk., (2007)
3	Propilen/Zeolit-NaY	-196	1	2,0	Chen dkk., (2007)
4	Asetonitril/Zeolit- $\beta$	-196	1	< 2,41	Yang dkk., 2006
5	Sukrosa/Zeolit-Y	-196	10	2,4	Guan dkk., (2009)
6	FA -doping N-tanpa aktivasi/Zeolit-Y	30	100	0,87	Nishihara dkk., (2009)
	FA -doping N-Aktivasi KOH/Zeolit-Y			0,79	
7	Poli furfural alkohol/	-196	10	2,4	Guan dkk.,

	Zeolit-Y		50	3,1	(2009)
		30	50	0,8	
8	Asetonitril/Zeolit-13X	-196	20	3,4	Yang dkk., (2006)
	Asetonitril/Zeolit-Y			4,5	
	Etilena/Zeolit-Y			2,9	
9	Furfuril alkohol-doping Pt/Zeolit-NaY	-196	1	1,00-1,59	Alam, (2011)
			20	3,02-4,85	
10	Asetonitril dengan variasi rasio Si/Al /Zeolit-Y				Alam, (2011a)
	Si/Al= 15	-196	1	0,8-1,5	
			20	2,3-3,5	
	Si/Al= 2,55		1	0,2-1,8	
			20	0,7-3,9	
	Si/Al= 1,36		1	0,03-1,4	
			20	0.1-1.6	

Evaluasi tingkat penyerapan hidrogen pada material sintesis karbon tertemplat zeolit ini diprakarsai oleh Yang dkk. tahun 2006 dan 2007, dimana dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis zeolit dan prekursor karbon. Pada tahun 2006 zeolit-Y/Asetonitril menghasilkan kapasitas penyimpan hidrogen yang lebih tinggi dibandingkan material lain yakni 4,5% berat. Sehingga tahun berikutnya Yang dkk. (2007), menguji zeolit- $\beta$ /Asetonitril yang menghasilkan luas permukaan 3.200 m<sup>2</sup>/g dan volume pori 2,41 cm<sup>3</sup>/g, serta kapasitas yang terukur sebesar 6,9% berat pada -196°C dan tekanan 20 bar. Setelah penelitian tersebut, kemudian banyak penelitian yang memfokuskan pada berbagai jenis templat zeolit dan prekursor karbon, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Berdasarkan Tabel 2.4, karbon tertemplat zeolit yang disintesis dengan templat zeolit-Y menunjukkan kapasitas penyimpan hidrogen yang relatif besar. Kapasitas penyimpan hidrogen mengalami kenaikan yang tinggi pada kondisi -196°C/20 bar. Zeolit-Y memiliki beberapa keunggulan diantaranya reaktivitas oksidasi lebih tinggi (Cordero dkk., 1992), keteraturan struktur pori zeolit-Y lebih besar dibandingkan dengan beberapa jenis zeolit lain (Kyotani dkk., 2003), dan memiliki stabilitas termodinamik yang relatif tinggi (Nishihara, 2009). Selain itu luas permukaan zeolit-Y yang lebih besar (520-725 m<sup>2</sup>/g) dibandingkan zeolit-A (360-383 m<sup>2</sup>/g), zeolit-MOR (418-460 m<sup>2</sup>/g) dan zeolit-RHO (3-90 m<sup>2</sup>/g), sehingga karakteristik zeolit-Y apabila diaplikasikan sebagai material penyimpan

hidrogen mampu menghasilkan kapasitas adsorpsi yang tinggi (Weitkamp dkk., 1995; Langmi dkk., 2003; dan Chung, 2010).

Penelitian terkait zeolit-Y telah dilakukan oleh Chen dkk. (2007), dengan mensintesis karbon tertemplat zeolit menggunakan zeolit-Y sebagai templat dengan penukar kation yang berbeda-beda (Ca, K, H, dan Na), serta propilena dan butilena sebagai prekursor karbon. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa zeolit-NaY menghasilkan luas permukaan dan volume mikropori paling tinggi, dibandingkan templat lain, yakni sebesar 2.117 m<sup>2</sup>/g dan 0,79 cm<sup>3</sup>/g dengan prekursor propilena dan 2.456 m<sup>2</sup>/g dan 1,0528 cm<sup>3</sup>/g dengan menggunakan prekursor butilena. Selain itu Guan dkk., (2009) menggunakan tempat zeolit-NH<sub>4</sub>Y dengan prekursor sukrosa, dimana hasil penelitian menunjukkan luas permukaan spesifik 1.500 m<sup>2</sup>/g dengan kapasitas penyimpanan hidrogen sebesar 2,4% berat pada kondisi 77K/10bar. Berdasarkan hal tersebut, maka penelitian ini menggunakan zeolit-NaY sebagai templat untuk sintesis karbon tertemplat zeolit.

Pemilihan prekursor karbon merupakan parameter yang harus diperhatikan agar diperoleh kapasitas penyimpanan hidrogen yang besar. Berbagai prekursor yang sering digunakan antara lain asetonitril (Alam, 2011 dan Xia, dkk., 2011), furfural alkohol (Masika dkk., 2013, Masika dkk., 2013a, dan Konwar dkk., 2013), pyrene, vinil asetat, akrilonitril (Meyer dkk., 2001), etilena (Xia dkk., 2013), propilena (Kyotani dkk., 2003 dan Chen dkk., 2007), dan sukrosa (Guan dkk., 2009 dan Cai dkk., 2014). Syarat prekursor karbon yang dapat digunakan untuk sintesis karbon tertemplat zeolit adalah sumber karbon harus memiliki *yield* karbon yang tinggi, ukuran molekul sesuai untuk dimasukkan dalam pori zeolit dan memiliki kelarutan tertentu (Sevilla dkk., 2010). Sukrosa dipilih sebagai prekursor karbon dalam penelitian ini sebab memiliki *yield* tinggi dan ukuran sesuai dengan pori zeolit. Selain itu penggunaan sukrosa dapat menghasilkan karbon dengan luas permukaan dan volume mikropori besar. Oleh karena itu dalam penelitian ini menggunakan sukrosa sebagai sumber atau prekursor karbon. Penelitian telah mengembangkan sukrosa sebagai prekursor karbon dengan berbagai templat, seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Sifat permukaan karbon tertemplat zeolit yang disintesis dengan sukrosa sebagai prekursor karbon

No.	Prekursor karbon	Jenis zeolit	Luas permukaan (m <sup>2</sup> /gr)	Volume mikropori (cm <sup>3</sup> /gr)	Pustaka
1	Sukrosa	NaY	1.752	0,48	Su dkk., (2005)
2	Sukrosa	HY	1.650	0,95	Klepel dkk., (2007)
3	Sukrosa	NH <sub>4</sub> Y	1.500	0,78	Guan dkk., (2009)
4	Sukrosa	USY	1.071,9-1.218,6	0,414-0,498	Cai dkk., (2014)

Kapasitas penyimpanan hidrogen sering kali dikaitkan dengan luas permukaan dan ukuran pori, dimana parameter utama yang lebih penting adalah pada ukuran pori. Banyak penelitian eksperimental ataupun simulasi menunjukkan bahwa ukuran pori optimal adsorben untuk adsorpsi hidrogen antara 0,65-0,9 nm (Bhatia, 2006; Gigras dkk., 2007; dan Ströbel, 2006). Pada karbon tertemplat zeolit struktur porinya terdiri dari mikropori, mesopori, dan beberapa karbon grafitik yang tidak memiliki pori. Pori berukuran mikro sesuai untuk digunakan sebagai material penyimpanan hidrogen. Akan tetapi untuk pori berukuran meso tidak sesuai diaplikasikan sebagai penyimpanan hidrogen, sebab ukuran pori meso lebih besar dari pori hidrogen sehingga hidrogen dapat terdesorpsi setelah memasuki pori. Hal ini sama halnya dengan grafitik yang tidak memiliki struktur pori. Adanya pori berukuran meso dan grafitik menyebabkan proses penyimpanan hidrogen dilakukan pada tekanan tinggi atau suhu yang relatif rendah (Guan dkk., 2009 dan Yang dkk., 2007).

Adanya kelemahan pada karbon tertemplat zeolit, perlu dilakukan modifikasi untuk menghasilkan ukuran pori mikro melalui proses aktivasi (Guan dkk., 2009). Aktivasi dilakukan melalui pemanasan material awal dengan aktivator pada suhu tinggi. Selama proses aktivasi terbentuk spesi aktif yang dapat terinterkalasi membentuk pori baru dengan ukuran sesuai jari-jari spesi yang terinterkalasi (Viswanathan dkk., 2009). Selain itu selama aktivasi terjadi pelepasan material volatil yang masih terdapat pada karbon tertemplat zeolit (Saragih, 2008).

Aktivasi dapat dikelompokkan menjadi dua berdasarkan material yang terlibat saat proses tersebut, yaitu aktivasi fisik dan kimia. Aktivasi fisik

melibatkan gasifikasi dengan menggunakan gas pengoksidasi seperti  $\text{CO}_2$  dan uap air (Yang dkk., 2012). Sedangkan aktivasi kimia dilakukan dengan zat yang dapat menghidrasi pada suhu tinggi seperti KOH, (Jiménez dkk., 2012),  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (Hayashi dkk., 2002),  $\text{ZnCl}_2$ , NaOH,  $\text{FeCl}_3$  (Oliveira dkk., 2009; Kilic dkk., 2012) dan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (Lee, 2012). Aktivasi kimia memiliki beberapa keunggulan, diantaranya suhu proses aktivasi yang rendah, waktu aktivasi yang lebih singkat, dan porositas yang lebih tinggi (Wang dkk., 2009 dan Yang dkk., 2012).

Berbagai penelitian terkait aktivasi fisik dan kimia telah dilakukan guna meningkatkan kapasitas penyimpanan hidrogen. Mokaya (2010), melakukan penelitian tentang aktivasi karbon tertemplat zeolit-Y melalui metode impregnasi dengan furfuril alkohol, yang diikuti oleh karbonisasi, kemudian karbonisasi lanjutan dengan metode CVD dibawah aliran asetonitril dalam argon. Hasil yang diperoleh yakni adanya luas permukaan yang tinggi ( $4.200 \text{ m}^2/\text{g}$ ) dan volume mikropori sebesar  $40,8 \text{ cm}^3/\text{g}$  dengan adanya doping nitrogen. Selain itu penelitian Sevilla dkk., (2010) menunjukkan bahwa aktivasi kimia karbon tertemplat zeolit-Y dengan KOH menghasilkan luas permukaan yang tinggi ( $1.850\text{-}3100 \text{ m}^2/\text{g}$ ) dan volume pori relatif besar ( $1,5\text{-}1,75 \text{ cm}^3/\text{g}$ ). Kisaran nilai luas permukaan meningkat hingga 84% dan volume pori meningkat dua kali lipat. Hasil ini berbanding lurus dengan kapasitas penyimpanan hidrogen, dimana meningkat dari 2,4-3,5% menjadi 4,3-6,1% berat setelah proses aktivasi ZTC.

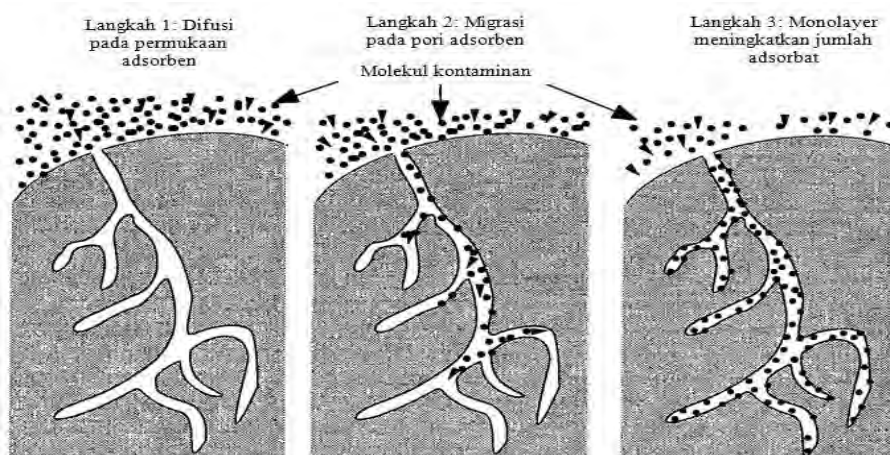
Penelitian lain terkait aktivasi karbon tertemplat zeolit-NaY telah dilakukan oleh Anggarini (2013) dengan menggunakan aktivator  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya luas permukaan dan volume mikropori yang relatif tinggi dengan nilai berturut-turut sebesar  $1.441,335 \text{ m}^2/\text{gr}$  dan  $0,698 \text{ cc/gr}$ . Nilai tersebut meningkat dibandingkan sebelum aktivasi, dimana luas permukaan naik hingga 52,35% dan volume mikropori juga naik lebih dari dua kali lipat. Rasio optimum aktivator  $\text{K}_2\text{CO}_3$  untuk karbon tertemplat zeolit-NaY ialah 1,5, dimana pada rasio tersebut terjadi peningkatan penyimpanan hidrogen sebesar 2,87% berat pada kondisi suhu  $30^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Aktivasi dengan menggunakan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ini lebih baik dan aman bila dibandingkan dengan KOH, sebab hanya menghasilkan spesi aktif berupa kalium, gas CO, dan gas  $\text{CO}_2$  dalam jumlah yang relatif lebih sedikit. Berdasarkan hal tersebut, maka dalam penelitian



ini digunakan aktivator  $K_2CO_3$  dengan rasio  $K_2CO_3$ /Karbon sebesar 1,5 dengan menggunakan metode impregnasi untuk sintesis karbon tertemplat zeolit-Y.

## 2.5 Mekanisme Penyimpanan Hidrogen pada Material Berpori

Penyimpanan hidrogen pada material berpori dilakukan melalui metode adsorpsi, dimana material berpori berperan sebagai adsorben dan gas hidrogen berperan sebagai adsorbat. Adapun mekanisme penyimpanan hidrogen pada material berpori melibatkan proses fisisorpsi atau adsorpsi fisika. Proses fisisorpsi merupakan mekanisme penyerapan molekul-molekul gas hidrogen pada permukaan material berpori yang terjadi secara *reversible* dengan kecepatan adsorp yang relatif besar. Pada proses tersebut, molekul hidrogen dapat dengan mudah teradsorb dan terlepas secara berulang tanpa kehilangan energi dan umumnya tidak ada energi aktivasi yang terlibat pada proses adsorpsi hidrogen. Hal ini menyebabkan proses adsorpsi dan desorpsi hidrogen berlangsung dengan cepat (Hirscher, 2009). Pada Gambar 2.9 merupakan skematik pengisian pori adsorben oleh molekul adsorbat yang terbagi dalam tiga tahap.



Gambar 2.9 Skematik pengisian pori adsorben oleh molekul adsorbat (Aerosol and Particulate Research Lab, 2011)

Pada skematik diatas, proses penyimpanan molekul adsorbat pada adsorben diawali dengan pembukaan pori adsorben akibat pemanasan pada suhu tinggi. Kemudian setelah adsorben dengan adsorbat saling kontak, terjadi difusi pada permukaan adsorben. Tahap berikutnya terjadi migrasi ke dalam pori adsorben yang dilanjutkan dengan adanya pembentukan monolayer adsorbat.

Pada proses penyimpanan H<sub>2</sub> oleh material berpori dipengaruhi oleh luas permukaan, sehingga adsorben yang memiliki luas permukaan yang besar akan sangat baik untuk menyimpan molekul-molekul hidrogen (Hirscher, 2009). Interaksi antara molekul gas dan permukaan material adsorben menghasilkan energi potensial panas yang dapat dijelaskan melalui Persamaan 2.2 *Lennard-Jones*:

$$V(r_i) = 4\epsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r_i} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r_i} \right)^6 \right] \quad (2.2)$$

dengan  $\epsilon$  adalah ukuran besarnya energi,  $r_i$  adalah jarak antara molekul H<sub>2</sub> dengan atom  $i$  pada permukaan material adsorben, dan  $\sigma$  adalah nilai  $r_i$  saat potensial nol (Hirscher, 2009).

Kapasitas adsorpsi material berpori dideskripsikan melalui isoterm adsorpsi. Kapasitas adsorpsi hidrogen ini menyatakan banyaknya hidrogen yang tersimpan setelah proses fisisorpsi berlangsung, dan dinyatakan dalam persen berat (% berat) ataupun dalam persen volume (%). Persamaan 2.3, merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan kapasitas penyimpanan hidrogen dalam persen berat (% berat) (Klebanoff, 2013 dan Hirscher, 2009).

$$\% \text{ berat} = \frac{m_{H_2}}{(m_{H_2} + m_s)} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

dengan :

$m_s$  = massa adsorben

$m_{H_2}$  = massa hidrogen teradsorp

Sedangkan untuk menentukan kapasitas penyimpanan hidrogen dengan menggunakan persen volume (% volume), maka dapat dihitung dengan Persamaan 2.4 berikut.

$$\% \text{ volume} = \frac{m_{H_2}}{V_s} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

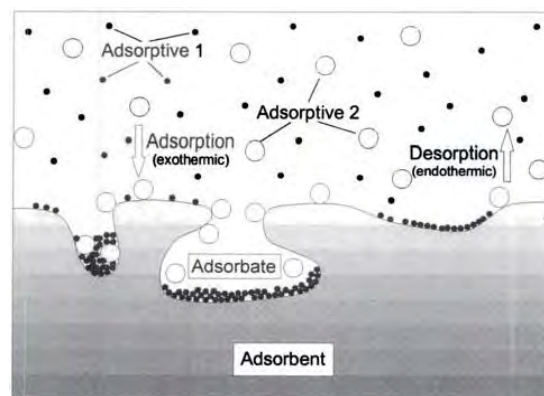
dengan :

$V_s$  = volume adsorben

$m_{H_2}$  = massa hidrogen teradsorp

## 2.6 Studi Adsorpsi Hidrogen pada Material Berpori

Adsorpsi didefinisikan sebagai keadaan yang terjadi apabila permukaan padat terkena gas atau cairan di sekitar lapisan antarmuka (Rouquerol, 1999). Adsorpsi terjadi karena molekul-molekul pada permukaan zat padat atau cair yang memiliki gaya tarik dalam keadaan tidak setimbang, yang cenderung tertarik ke arah dalam atau gaya kohesi adsorben lebih besar daripada gaya adhesinya. Ketidaksetimbangan gaya tarik tersebut mengakibatkan zat padat yang digunakan sebagai adsorben cenderung menarik zat-zat lain (fasa gas atau fasa cair) yang bersentuhan dengan permukaannya (Alberty, 1990). Adapun ketika molekul yang teradsorpsi akan terlepas dan berubah fasa kembali menjadi gas atau cair disebut sebagai fenomena desorpsi (Keller, J.U., 2005).



Gambar 2.10 Fenomena adsorpsi dan desorpsi (Keller, J.U., 2005)

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, maka adsorpsi dapat diklasifikasikan ke dalam dua bagian, yakni :

### 1. Adsorpsi fisika

Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya intramolekular (gaya tarik-menarik yang relatif lemah) antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Pada proses fisisorpsi, adsorbat tidak terikat kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lainnya, dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat yang satu dapat digantikan oleh adsorbat lainnya hingga membentuk lapisan *multilayer* (Alberty, 1990).

## 2. Adsorpsi kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya reaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan permukaan adsorben dan terbentuknya ikatan kimia. Gaya ikat adsorpsi kimia bervariasi dan bergantung pada zat yang bereaksi, seperti ikatan hidrogen, kovalen dan ionik. Akibat adanya ikatan kimia yang cukup kuat, maka adsorbat hanya teradsorpsi pada lapisan pertama atau lapisan *monolayer* meskipun dilakukan peningkatan suhu dan konsentrasi (Alberty, 1990).

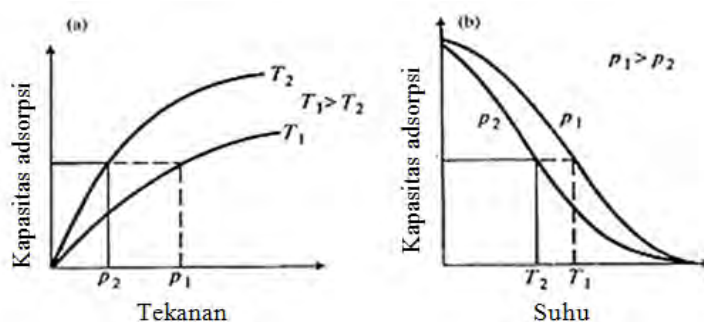
Kedua jenis adsorpsi diatas dapat dibedakan menurut beberapa parameter, sebagaimana terlampir dalam Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2.6 Perbedaan antara adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia

No	Parameter	Adsorpsi fisika	Adsorpsi kimia
1	Jenis Ikatan	Fisika ( <i>van der Waals</i> )	Kimia (Ikatan kovalen, hidrogen, ionik)
2	Entalpi adsorpsi	Entalpi adsorpsi kecil ( $\Delta H_{ad} < 20,92 \text{ kJ.mol}^{-1}$ )	Entalpi adsorpsi cukup besar ( $\Delta H_{ad} > 20,92 \text{ kJ.mol}^{-1}$ )
3	Energi aktivasi	$< 1 \text{ kkal/g mol}$	10-60 kkal/g mol
4	Temperatur	Terjadi pada temperatur di bawah titik didih adsorbat (temperatur relatif rendah)	Memungkinkan terjadi pada temperatur tinggi
5	Reversibilitas	Reaksi <i>reversible</i>	Reaksi <i>irreversible</i>
6	Tebal lapisan	<i>Multilayer</i>	<i>Monolayer</i>
7	Kecepatan adsorpsi	Besar	Kecil
8	Jumlah zat teradsorpsi	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan jumlah inti aktif adsorben yang bereaksi dengan adsorbat

Sumber : Orthmer, 1991; Atkins, 1996; Rouquerol, 1999

Adsorpsi hidrogen dengan material berpori selain perlu mempertimbangkan jenis adsorben dan ukuran adsorbat, maka kondisi suhu dan tekanan adsorpsi juga merupakan faktor yang sangat berpengaruh. Pengaruh dari tekanan dan suhu pada adsorpsi hidrogen ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik pengaruh tekanan (a) dan suhu (b) pada adsorpsi hidrogen (Ströbel dkk., 2006)

Berdasarkan Gambar 2.11 kapasitas adsorpsi hidrogen pada material berpori semakin bertambah besar jika suhu semakin kecil dan tekanan semakin besar. Melalui optimalisasi pada suhu dan tekanan, maka akan didapatkan kapasitas penyimpanan hidrogen yang relatif besar.

Berbagai penelitian terkait adsorpsi hidrogen oleh material berpori dengan variasi suhu dan tekanan telah banyak dilakukan. Material berpori yang dikaji antara lain zeolit, karbon aktif, MCM-41, MOF, dan lain sebagainya. Beberapa penelitian yang melibatkan material berpori dengan variasi tekanan dan suhu untuk mengadsorpsi hidrogen sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Adsorpsi hidrogen pada beberapa jenis material berpori dengan variasi suhu dan tekanan

No.	Material berpori	Suhu (K)	Tekanan (bar)	Adsorpsi (% berat)	Pustaka
1	MCM-41 dengan variasi doping Zn	77-296	0-45	0,1-2,09	Sheppard dkk.,(2008)
2	MCM-41/ karbon	77	0-1	2,01	Xia dkk., (2013)
		298	0-80	0,67	
3	MOF-177	77	100	1,5	Li Y dan Yang (2007)
		77	1,01	1,28	
		298	100	0,62	
4	Sodalite-ZMOF	77	0-10	1,6	Calleja dkk., (2010)
5	AC-aktivasi KOH	77	0-80	6,6	Zhao dkk., (2011)
6	AC-aktivasi KOH doping N	77	0-80	4,4-6,5	Zhao dkk., (2013)
7	Zeolit-NaY/Asetonitril doping Nitrogen	298	0-101,32	0,51	Wang dkk., (2009)
8	Zeolit-CaX	77	0-15	2,19	Langmi dkk.,(2005)
	Zeolit-NaX			1,79	
	Zeolit-NaY			1,81	

Berdasarkan Tabel 2.7 ditunjukkan bahwa adsorpsi hidrogen pada suhu rendah dan tekanan tinggi memiliki kapasitas penyimpanan hidrogen yang lebih besar. Adsorpsi hidrogen maksimum terjadi pada material karbon aktif dengan aktivasi KOH yaitu 6,6% berat, dengan kondisi suhu 77K dan tekanan 0-80 bar, namun penyimpanan hidrogen pada suhu rendah dan tekanan tinggi membutuhkan biaya besar. Selain itu persyaratan untuk aplikasi hidrogen sebagai bahan bakar kendaraan adalah penyimpanan dilakukan pada suhu ruang dan tekanan yang aman atau rendah (Thomas dkk., 2007). Target DoE dalam suhu operasi penyimpanan hidrogen yakni -40/95-105°C dan tekanan dalam penyimpanan hidrogen yakni 3-12 bar (Yang dkk., 2010). Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji adsorpsi hidrogen pada suhu dasar konstan dan tekanan rendah.

Aplikasi penyimpanan hidrogen untuk bahan bakar kendaraan bermotor menuntut banyak persyaratan antara lain tekanan operasi rendah, suhu operasi rendah, kinetika cepat untuk adsorpsi atau desorpsi hidrogen, stabilitas termodinamika rendah, konduktivitas termal baik, dan biaya murah (Guo dkk., 2008). Adsorpsi hidrogen menggunakan material berpori merupakan salah satu metode yang dipertimbangkan untuk memenuhi persyaratan tersebut (Thomas dkk., 2007). Penggunaan hidrogen fisisorpsi pada material berpori melibatkan kekuatan relatif dari ikatan yang terbentuk antara molekul hidrogen dengan material berpori, dimana ikatan tersebut akan mempengaruhi kinetika dan termodinamika material penyimpan hidrogen (Gross dan Carrington, 2008). Beberapa pengukuran penting dalam aplikasi ini adalah pengukuran jumlah yang terserap sebagai fungsi dari tekanan, ketergantungan suhu adsorpsi, entalpi adsorpsi, entropi adsorpsi, dan karakteristik adsorpsi (Thomas dkk., 2007).

Pengukuran jumlah teradsorpsi dapat dibandingkan dengan menggunakan isoterm adsorpsi. Selain itu dalam aplikasinya, isoterm adsorpsi dapat digunakan untuk mengetahui jenis adsorpsi yang terjadi antara adsorbat dengan adsorben. Pada material berpori, permukaan yang diukur akan bergantung pada ukuran molekul yang diselidiki, penggunaan model isoterm adsorpsi serta tingkat mikropori pada adsorben (Thomas dkk., 2007 dan Foo, 2010). Selain itu, hubungan antara tingkat penyerapan hidrogen terhadap waktu dapat diukur dengan menggunakan studi kinetika. Studi kinetika ini diperlukan guna

mengetahui kemampuan laju penyerapan dan pelepasan hidrogen pada material berpori (Sakintuna, 2006). Hidrogen perlu diberikan pada tingkat yang cukup tinggi untuk sel bahan bakar, agar dapat mempercepat pengisian dan mempertahankannya pada kecepatan yang diinginkan (Gross dan Carrington, 2008). Beberapa penelitian adsorpsi hidrogen yang mempelajari model isoterm adsorpsi dan studi kinetika telah dilakukan dengan menggunakan berbagai material berpori, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Isoterm dan kinetika adsorpsi hidrogen dengan berbagai jenis material berpori

Jenis material	Model Isoterm	Model Kinetika	Laju Kinetika	Kondisi adsorpsi	Kapasitas adsorpsi	Pustaka
MOF-177	Freundlich	Difusi	T=77 K/1 bar (0,0964 detik)	T = 77; 194,5; dan 297 K P = 0-1 bar	< 1,0%	Saha dkk., (2008)
			T= 194,5 K/1 bar (0,2140 detik)	T = 77; 194,5; dan 297 K P = 0-100 bar	< 20%	
			T= 297 K/1 bar (0,3023 detik)	T = 297 K P = 0-1 bar	0,37%	
Zeolit-NaX,PIM, Carbon IRMOF, Cu-BTC	Sips dan Tóth	-	-	T = 77K P = 0-15 bar	1,6 - 4,5	Tedds dkk., (2011)
Karbon aktivasi	Langmuir	Memakai IGA	T = 77K/ 1 bar (<2 menit)	T = 77K P= 1 bar	Max 2,15%	Zhao dkk., (2005)
Zeolit-(Mg-Na)Y	Langmuir	-	-	T = 77K P= 1,01 bar	3-4,5%	Arean dkk., (2007)
MWCNT-95%;SWCNT-85%	Langmuir	-	-	T = 25 P = 1,01 bar	0,22% dan 0,36%	Gerasimos (2010)
Karbon aktivasi	Langmuir	-	-	T=77K dan 298K P = 1-70 bar	4,5%	Panella dkk., (2005)
SWCNT					< 2,5%	
Si/Al= 15	Isoterm Tipe-I	-	-	T= 77K P= 1 bar	0,8-1,5%	Alam, (2011a)
Si/Al= 2,55					0,2-1,8%	
Si/Al= 1,36					0,03-1,4%	

Berdasarkan Tabel 2.8, dapat diketahui bahwa material berpori sebagai penyimpan hidrogen cenderung mengikuti pendekatan isoterm Langmuir, dimana penyerapan mengambil pada tempat spesifik yang homogen dalam adsorben dan distribusi yang seragam dari tempat adsorpsi energetik. Model Langmuir ini mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi pada lapisan *monolayer* (Panella dkk., 2005), disamping itu mekanisme dominan yang terjadi adalah adsorpsi fisik (Dong dkk., 2007). Alam (2011a) menunjukkan isoterm tipe-I dimana material yang terbentuk memiliki ukuran mikropori dengan proses adsorpsi yang terjadi merupakan kemisorpsi. Saha dkk., (2008) menunjukkan bahwa adsorpsi terjadi pada lapisan *multilayer* yang sesuai dengan model isoterm Freundlich, selain itu hasil korelasi persamaan Freundlich sesuai untuk tekanan rendah. Pada Tabel 2.8, ditunjukkan bahwa studi kinetika relatif sedikit untuk diteliti, hal ini dikarenakan banyak peneliti telah menyebutkan bahwa fisisorpsi hidrogen pada material berpori memiliki keuntungan kinetika cepat dalam penyerapan dan pelepasan hidrogen (Palomino dkk., 2008; Hirscher, 2009; dan Yürüm (2009). Hal ini terbukti pada penelitian Saha dkk., (2008) dan Zhao dkk., (2005), dimana nilai kinetika cepat dan sesuai dengan target DoE yakni <1-2% massa/menit atau maksimum 2,5 menit (Guo dkk.,2008 dan Yang dkk.,2010).

Meskipun material berpori memiliki kinetika cepat dalam menyerap dan melepas hidrogen, namun masih terdapat hambatan yang signifikan yakni interaksi antara molekul hidrogen dengan dinding pori adsorben masih memiliki gaya *van der Waals* yang lemah. Hal ini berdampak pada energi interaksi atau entalpi adsorpsi yang dihasilkan rendah hanya sebesar 5-6 kJ.mol<sup>-1</sup> (Palomino dkk., 2008). Siklus penyimpanan dan pelepasan hidrogen harus memiliki entalpi adsorpsi yang tidak terlalu rendah agar mampu menyerap hidrogen dengan kapasitas besar, serta tidak terlalu tinggi untuk memfasilitasi proses pelepasan hidrogen (Hirscher, 2009).

Beberapa peneliti telah melaporkan studi termodinamika dengan menggunakan adsorbat gas, antara lain gas hidrogen, gas karbondioksida, dan gas alam. Studi termodinamika pada adsorbat gas sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.9 berikut.



Tabel 2.9 Penggunaan variasi suhu dan tekanan pada proses adsorpsi dengan berbagai jenis adsorbat gas

Jenis material adsorben	Adsorbat	Variasi Suhu	Variasi Tekanan	Pustaka
MOF-177	Gas hidrogen	77; 100, 125; dan 150K	0-1,05 bar	Saha dkk., (2008)
PuNi <sub>3</sub>	Gas hidrogen	75; 100, 125; dan 150K	0,1-25 bar	Sivakumar dkk., (2000)
TiNT dengan Prussian blue	Gas hidrogen	77; 85,5; dan 88,5K	50, 100, dan 135 bar	Zamora dkk., (2013)
MWCNT	Gas alam	283; 298; 318K	0-1,0 bar dan 0-55 bar	Delavar dkk., (2012)
Karbon aktif	Gas karbondioksida	298; 308; 318; dan 333K	0-1 bar	Hauchhum dan Mahanta (2014)
MWCNT	Gas karbondioksida	298; 308; dan 318K	0-50 bar	Khalili dkk., (2013)

Berdasarkan Tabel 2.9, maka pada penentuan adsorpsi hidrogen pada karbon teremplat zeolit-Y dilakukan pada suhu 303K, 313K, dan 323K. Adapun tekanan rendah yang digunakan dalam penelitian ini tidak melebihi dari prasyarat yang ditetapkan oleh DoE sebesar 1; 1,5; 2 dan 3 bar.

Bhatia dan Myers (2006), menganalisa persyaratan termodinamika untuk adsorben dalam aplikasi penyimpanan hidrogen. Penelitian tersebut menunjukkan tekanan pengisian yang wajar pada 30 bar dan pelepasan hidrogen terjadi pada 1,5 bar secara *reversible*. Sehingga entalpi rata-rata optimum yang didapatkan sebesar 15 kJ.mol<sup>-1</sup> dan entropi rata-rata sebesar 66,5 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Apabila entalpi yang didapatkan kurang dari entalpi optimum, menyebabkan suhu optimum lebih rendah daripada suhu kamar. Sedangkan apabila nilai entalpi mendekati lebih besar dari entalpi optimum, maka tekanan adsorpsi yang tinggi pada penyimpanan hidrogen akan menurun hingga tekanan ruang pada saat pelepasan hidrogen (Hirscher, 2009). Entalpi adsorpsi dan entropi adsorpsi memiliki hubungan yang jelas, dimana nilai entropi meningkat dengan nilai entalpi juga meningkat (Garrone dkk., 2008). Untuk aplikasi penyimpanan hidrogen, baru-baru ini disebutkan bahwa pada kondisi maksimal suhu 100°C dan tekanan 1 bar, serta

entalpi adsorpsi antara 15-25 kJ.mol<sup>-1</sup> dapat menyimpan dan melepas hidrogen dengan cepat (Guo dkk., 2008). Beberapa penelitian melaporkan bahwa entalpi adsorpsi zeolit masih relatif rendah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Entalpi dan entropi adsorpsi hidrogen dengan berbagai jenis material berpori

Jenis material zeolit	$\Delta V_{H-H}$ (cm <sup>-1</sup> )	$-\Delta H^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$-\Delta S^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Pustaka
Zeolit Ca-Y	4078	15	127	Palomino dkk., (2008)
Zeolit Mg-X	4065	13	114	Palomino dkk., (2010)
Zeolit Li-ZSM-5	4092	6,5	90	Arean dkk., (2003)
Zeolit Na-ZSM-5	4101	10,3	121	Arean dkk., (2005)
Zeolit K-ZSM-5	4112	9,1	124	
Zeolit-(Mg,Na)-Y	4056	18,2	136	Arean dkk., (2007)
Zeolit Ca-A	4083	12	-	Arean dkk., (2009)

Berdasarkan Tabel 2.10, menunjukkan bahwa entalpi adsorpsi pada beberapa zeolit tergolong rendah, namun berbeda pada zeolit-(Mg,Na)-Y yang memiliki entalpi adsorpsi lebih tinggi dari panas pencairan hidrogen (*hydrogen liquefaction heat*). Hal ini menunjukkan bahwa zeolit-(Mg,Na)-Y potensial untuk digunakan sebagai material penyimpan hidrogen *reversible* (Arean dkk., 2007). Disamping itu, penelitian tersebut menunjukkan nilai entropi lebih rendah dari batas maksimum yang ditentukan (<160 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) (Garrone dkk., 2008). Meskipun zeolit tersebut memiliki nilai entalpi dan entropi yang sesuai, namun kapasitas adsorpsi yang dihasilkan belum memenuhi target DoE, hanya sebesar 3-4,5% berat. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan mengkaji studi adsorpsi karbon teremplat zeolit, agar dapat diketahui kemampuannya dalam menyerap hidrogen, isoterm adsorpsi yang sesuai, serta sifat termodinamik material tersebut.

## **2.7 Teori Adsorpsi Hidrogen**

### **2.7.1 Isoterm Adsorpsi**

Dalam penentuan jenis adsorpsi meliputi adsorpsi fisika atau adsorpsi kimia, maka dapat dilakukan perhitungan isoterm adsorpsi. Isoterm adsorpsi merupakan proses adsorpsi yang terjadi pada suhu yang konstan. Isoterm adsorpsi terkarakterisasi oleh nilai konstanta tertentu yang menggambarkan karakteristik permukaan, afinitas dari adsorben, dan kapasitas adsorpsi dari adsorben. Jika adsorbat yang digunakan berupa gas, maka banyaknya molekul yang teradsorpsi merupakan fungsi dari tekanan, sedangkan fungsi konsentrasi dan suhu jika adsorbatnya berupa larutan (Alberty, 1990). Beberapa model isoterm adsorpsi yang akan dikaji antara lain Langmuir, Freundlich, Tempkin, dan Sips.

#### **2.7.1.1 Isoterm Adsorpsi Langmuir**

Teori Langmuir mengenai adsorpsi adalah teori tempat adsorpsi tertentu (*localized site theory*), yaitu bahwa molekul-molekul zat teradsorpsi hanya dapat diadsorpsi pada tempat-tempat tertentu, sehingga lapisan teradsorpsi hanya dapat setebal satu molekul, sedangkan jumlah molekul yang maksimal dapat diadsorpsi tidak dapat lebih dari jumlah tempat yang tersedia.

Model isoterm adsorpsi Langmuir mengasumsikan bahwa penyerapan mengambil pada tempat spesifik yang homogen dalam adsorben dan distribusi yang seragam dari tempat adsorpsi energetik. Sehingga setelah molekul adsorbat menempati tempat tertentu, maka tidak ada lagi penyerapan yang dapat terjadi pada tempat tersebut. Oleh karena itu, model Langmuir valid untuk adsorpsi *monolayer* pada permukaan dengan jumlah terbatas pada tempat yang sama.

Isoterm adsorpsi Langmuir merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya ikatan kimia antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Karena ikatan kimia yang terjadi cukup kuat, maka ketika permukaan adsorben sudah ditutupi adsorbat, adsorbat hanya teradsorpsi pada lapisan pertama meskipun dilakukan peningkatan konsentrasi, suhu, atau tekanan.

Isoterm adsorpsi Langmuir ini pada umumnya digunakan untuk mempelajari fenomena adsorpsi suatu larutan atau gas. Untuk adsorpsi dalam sistem gas, parameter Langmuir ditentukan dengan persamaan 2.5 berikut.

$$q_e = q_m \frac{K_L P}{1 + K_L P} \quad (2.5)$$

Model liniernya yakni :

$$\frac{P}{q_e} = \frac{1}{q_m + K_L} + \frac{P}{q_m} \quad (2.6)$$

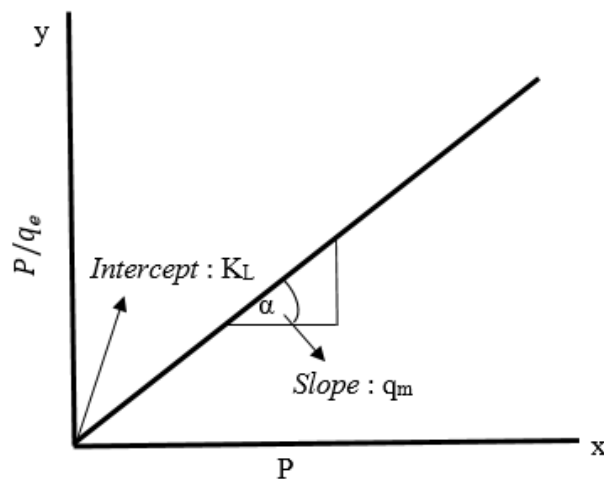
dimana :

$q_e$  = kapasitas adsorpsi saat setimbang (mmol.g<sup>-1</sup>)

$q_m$  = kapasitas adsorpsi saat maksimum (mmol.g<sup>-1</sup>)

$K_L$  = konstanta adsorpsi Langmuir (bar<sup>-1</sup>)

$P$  = tekanan adsorpsi (bar)



Gambar 2.12 Plot grafik isoterm adsorpsi Langmuir

#### 2.7.1.2 Isoterm Adsorpsi Freundlich

Adsorpsi Freundlich merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya ikatan fisika antara adsorbat (zat yang diserap) dengan permukaan adsorben (zat yang menyerap). Ketika permukaan adsorben telah tertutupi adsorbat, maka adsorbat tidak hanya terserap pada permukaan adsorben. Hal ini dikarenakan ikatan fisika yang terjadi relatif lemah, sehingga jika terjadi peningkatan suhu, konsentrasi ataupun tekanan, adsorpsi adsorbat pada adsorben juga akan meningkat dengan membentuk lapisan pertama, kedua, dan seterusnya

untuk menghasilkan lapisan *multilayer*. Model Freundlich menganggap permukaan heterogen dengan distribusi panas adsorpsi yang tidak seragam pada permukaan (Adamson, 1997 dan Foo, 2010).

Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya tarik antar molekul atau gaya tarik menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben, gaya ini disebut dengan gaya *van der Waals*. Hal ini mengakibatkan adsorbat dapat bergerak dari satu bagian permukaan ke bagian permukaan lain dari adsorben. Adsorpsi ini berlangsung sangat cepat dan dapat bereaksi balik (*reversible*), karena energi yang dibutuhkan rendah.

Isoterm adsorpsi Freundlich ditentukan dengan Persamaan 2.7 berikut.

$$q_e = K_F P^{1/n} \quad (2.7)$$

dimana :

$q_e$  = kapasitas adsorpsi saat setimbang ( $\text{mmol.g}^{-1}$ )

$K_F$  = faktor kapasitas Freundlich ( $\text{mmol.g}^{-1}/(\text{bar})^{1/n}$ )

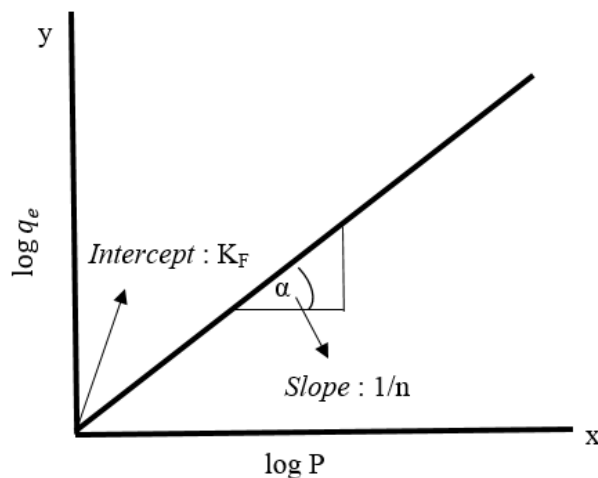
$1/n$  = parameter intensitas Freundlich

$P$  = tekanan adsorpsi (bar)

atau dalam bentuk persamaan logaritmik, dinyatakan sebagai berikut.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log P \quad (2.8)$$

(Broom, 2011)



Gambar 2.13 Plot grafik isoterm adsorpsi Freundlich

### 2.7.1.3 Isoterm Adsorpsi Tempkin

Isoterm Tempkin menjelaskan tentang interaksi antara adsorben dengan adsorbat. Dengan mengabaikan nilai yang sangat rendah dan besar konsentrasi, model ini mengasumsikan bahwa panas adsorpsi (fungsi suhu) dari semua molekul di lapisan akan menurun secara linear dengan jumlah interaksi antara adsorbat dan adsorben. Persamaan Tempkin ini sangat baik untuk memprediksi kesetimbangan dalam fase gas (Foo, 2010).

Adsorpsi Tempkin ini merupakan adsorpsi kimia dan mempunyai sifat yang *irreversible*. Adsorpsi Tempkin ini merupakan bentuk penurunan rumus dari adsorpsi Langmuir, hanya saja perbedaannya untuk adsorpsi Tempkin berlaku pada permukaan yang heterogen, sedangkan adsorpsi Langmuir berlaku pada permukaan yang homogen. Adapun persamaan Tempkin dalam adsorpsi gas sebagai berikut.

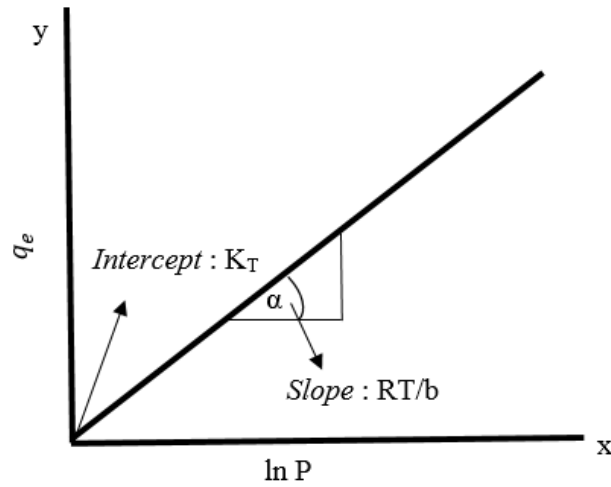
$$q_e = \frac{RT}{b} \ln K_T P \quad (2.9)$$

Model liniernya yakni :

$$q_e = B_1 \ln K_T + B_1 \ln P \quad (2.10)$$

$$B_1 = \frac{RT}{b} \quad (2.11)$$

Plot model Tempkin dari  $q_e$  terhadap  $\ln P$  digunakan untuk menentukan isoterm  $K_T$  dan  $B_1$ .  $P$  adalah tekanan adsorpsi (bar) dan  $q_e$  adalah kapasitas adsorpsi saat setimbang ( $\text{mmol.g}^{-1}$ ). Untuk  $K_T$  adalah konstanta kesetimbangan yang cocok digunakan untuk energi ikatan maksimum ( $\text{bar}^{-1}$ ) dan konstanta  $B_1$  berhubungan dengan bagian adsorpsi.



Gambar 2.14 Plot grafik isotherm adsorpsi Tempkin

#### 2.7.1.4 Isotherm Adsorpsi Sips

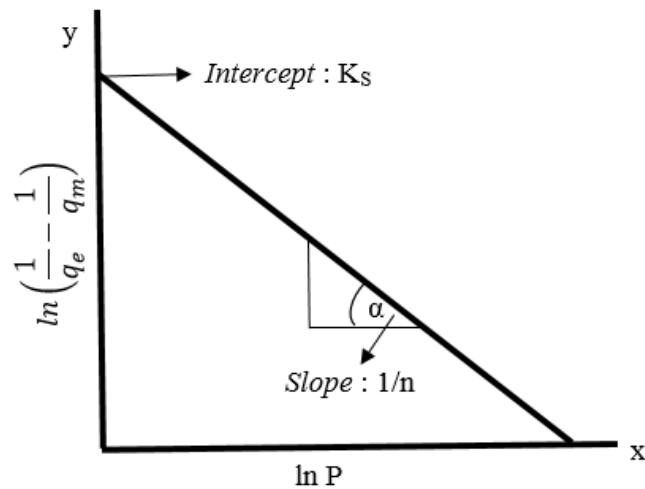
Isotherm Adsorpsi Sips merupakan bentuk gabungan Langmuir dan Freundlich untuk memprediksi sistem adsorpsi heterogen dan menghindari keterbatasan peningkatan konsentrasi adsorbat terkait dengan model isotherm Freundlich. Pada konsentrasi adsorbat rendah, maka mengurangi sampai isotherm Freundlich, sedangkan pada konsentrasi tinggi memprediksi kapasitas karakteristik *monolayer* isotherm adsorpsi Langmuir (Tedds, 2011). Persamaan isotherm adsorpsi Sips sebagai berikut.

$$q_e = q_m \frac{(K_S P)^{1/n}}{1 + (K_S P)^{1/n}} \quad (2.12)$$

Model liniernya yakni :

$$\ln \left( \frac{1}{q_e} - \frac{1}{q_m} \right) = \ln \left( \frac{K_S^{-1/n}}{q_m} \right) - \frac{1}{n} \ln P \quad (2.13)$$

dengan  $P$  adalah tekanan adsorpsi (bar);  $q_e$  adalah kapasitas adsorpsi saat setimbang ( $\text{mmol.g}^{-1}$ );  $q_m$  adalah kapasitas adsorpsi maksimum ( $\text{mmol.g}^{-1}$ );  $K_S$  ( $\text{bar}^{-1}$ ) dan  $n$  adalah konstanta (Tedds dkk., 2011).



Gambar 2.15 Plot grafik isotherm adsorpsi Sips

### 2.7.2 Termodinamika Adsorpsi

Sifat termodinamika bahan yang digunakan sebagai penyimpanan hidrogen terkait pada suhu operasi dan kisaran tekanan (Broom, 2011). Panas adsorpsi mencerminkan perubahan entalpi sebelum dan sesudah adsorpsi, oleh karena itu, adalah ukuran dari kekuatan interaksi antara molekul gas dan permukaan adsorben (Delavar, 2012). Dalam menentukan parameter termodinamika adsorpsi hidrogen oleh karbon tertemplat zeolit, dapat ditentukan dengan menghitung harga entalpi adsorpsi ( $\Delta H^\circ_{ads}$ ), entropi adsorpsi ( $\Delta S^\circ_{ads}$ ), dan energi bebas adsorpsi ( $\Delta G^\circ_{ads}$ ).

Entalpi adsorpsi dan entropi adsorpsi hidrogen dihitung dari isotherm-PC dengan memplot grafik antara  $\ln P_{H_2}$  versus  $1/T$  menurut persamaan *Van't Hoff* sebagai berikut (Sivakumar, 2000).

$$\ln P_{H_2} = 2 \left( \frac{\Delta H^\circ}{RT} - \frac{\Delta S^\circ}{R} \right) \quad (2.14)$$

dimana :

$\Delta H^\circ$  = entalpi adsorpsi hidrogen ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ )

$\Delta S^\circ$  = entropi adsorpsi hidrogen ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ )

R = tetapan gas ( $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

T = suhu (K)



*Slope* akan memberikan garis lurus ( $2\Delta H^\circ/R$ ), sedangkan *intercept* akan memberikan persamaan  $-(2\Delta S^\circ/R)$ . Adapun untuk menentukan energi bebas adsorpsi ( $\Delta G^\circ_{ads}$ ), dengan persamaan berikut (Delavar, 2012).

$$\Delta G^\circ_{ads} = -RT \ln K^\circ_L = \Delta H^\circ_{ads} - T\Delta S^\circ_{ads} \quad (2.15)$$

dimana :

$\Delta H^\circ$  = entalpi adsorpsi hidrogen ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ )

$\Delta S^\circ$  = entropi adsorpsi hidrogen ( $\text{J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

$\Delta G^\circ$  = energi bebas adsorpsi hidrogen ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ )

$K^\circ_L$  = konstanta kesetimbangan untuk tipe adsorpsi Langmuir

R = tetapan gas ( $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

T = suhu (K)

## 2.8 Karakterisasi

Karakterisasi material padatan yang digunakan untuk mengetahui karakter karbon tertemplat zeolit baik sebelum dan setelah aktivasi antara lain Difraksi Sinar-X atau *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan analisa adsorpsi gas.

### 2.8.1 *X-Ray Diffraction* (XRD)

Difraksi Sinar-X atau *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan teknik analisis *nondestruktif* yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa, penentuan struktur kristal, komposisi, dan tingkat kristalinitas material. Pada dasarnya, material dibedakan menjadi 2 bentuk yaitu *amorf* dan kristalin. Material *amorf* adalah bentuk dimana atom-atom tersusun secara random dan tidak teratur, sedangkan kristalin adalah suatu bentuk dengan atom-atom yang tersusun teratur, dimana terdapat suatu unit sel yang mengalami repetisi membentuk suatu pola yang disebut dengan kristal.

Apabila sinar-X ditembakkan pada permukaan sampel yang di analisa mengakibatkan terjadinya transisi elektron hingga dihasilkan emisi sinar pantul yang dapat terdeteksi oleh detektor dan muncul pola-pola difaktogram yang menunjukkan kristalinitas suatu sampel (Klug dan Alexander, 1974).

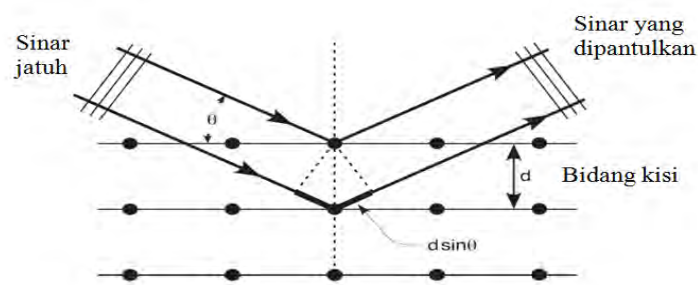
Pada tahun 1913, seorang fisikawan Inggris W.L Bragg menyatakan bahwa berkas sinar-X monokromatik yang jatuh pada sebuah kristal akan didifraksikan ke segala arah (Atkins, 1998). Hukum Bragg merumuskan secara matematis persyaratan agar berkas sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi.

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (2.16)$$

dimana :

- $\lambda$  = panjang gelombang sinar-X yang digunakan
- $d_{hkl}$  = jarak antar bidang dengan indeks miller hkl
- $n$  = orde pembiasan yang berupa bilangan bulat mulai dari 1
- $\theta$  = sudut difraksi sinar-X yang terjadi

Dalam analisis kristal, sinar-X digunakan untuk memancarkan pita-pita radiasi  $K_{\alpha 1}$  dan  $K_{\alpha 2}$ . Radiasi yang digunakan biasanya radiasi Cu  $K_{\alpha}$  dengan panjang gelombang 1,54 Å. Berkas sinar radiasi Cu  $K_{\alpha}$  ini jika mengenai bidang kristal suatu padatan, maka bidang kristal akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang yang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar-X yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor dan diterjemahkan sebagai fungsi sudut refleksi  $2\theta$  atau puncak-puncak difraksi. Puncak difraksi yang didapatkan dari pengukuran, kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X yang ada di database JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*). Adapun proses pemantulan Bragg ditunjukkan pada Gambar 2.16.

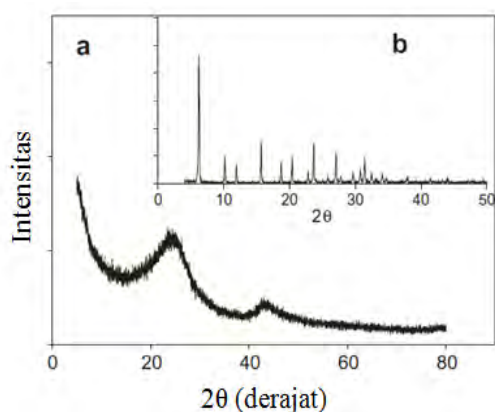


Gambar 2.16 Difraksi Bragg pada dua bidang kisi

Intensitas refleksi ditentukan oleh distribusi elektron dalam unit sel. Densitas elektron tertinggi terdapat pada sebuah atom, sehingga intensitas tergantung dari jenis atom dan posisi atom dalam unit sel. Bidang dengan densitas elektron tinggi, akan direfleksikan dengan kuat, dan sebaliknya bidang dengan densitas elektron rendah akan memiliki intensitas yang lemah. Oleh karena itu, data yang diperoleh dari pembacaan XRD berupa intensitas versus  $2\theta$ .

Pada penelitian ini karakterisasi XRD pada cuplikan zeolit digunakan untuk mengkonfirmasi pembentukan zeolit dengan mencocokkan pada standar JCPDS, sedangkan untuk karbon digunakan untuk mengetahui perubahan kristalinitas serta distorsi kisi berdasarkan pola difraksinya.

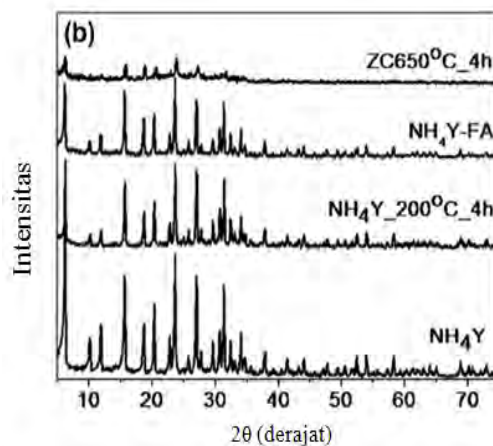
Guan dkk. (2009), melakukan penelitian menggunakan sukrosa sebagai prekursor dan zeolit-NH<sub>4</sub>Y sebagai templat. Material karbon tertemplat zeolit dan zeolit-NH<sub>4</sub>Y yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi dengan XRD dan diperoleh pola difraktogram seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.17. Berdasarkan Gambar 2.17 (a) karbon tertemplat zeolit memiliki puncak khas pada  $2\theta = 25^\circ$  dan  $43^\circ$ , hal ini mengindikasikan bidang (002) dan (110) dari karbon grafit, sedangkan Gambar 2.17 (b) terdapat pola difraktogram zeolit-NH<sub>4</sub>-Y yang memiliki puncak khas pada  $2\theta = 6^\circ$  yang mengindikasikan bidang (111) dari zeolit-Y.



Gambar 2.17 (a) Pola XRD karbon tertemplat zeolit (b) Pola XRD zeolit-NH<sub>4</sub>Y

Konwar dkk., (2013) melakukan penelitian dengan menggunakan furfural alkohol sebagai prekursor dan zeolit-NH<sub>4</sub>Y sebagai templat. Material tersebut kemudian dikarakterisasi dengan XRD saat proses pembuatan zeolit-NH<sub>4</sub>Y hingga

dihasilkan karbon tertemplat zeolit. Adapun pola difraktogram seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18.

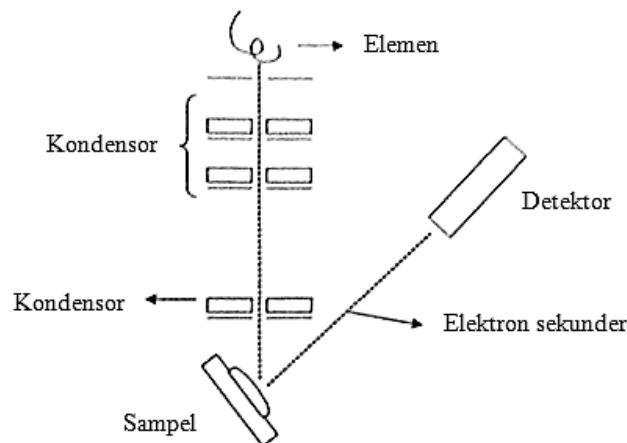


Gambar 2.18 Zeolit-NH<sub>4</sub>Y pada berbagai tahap karbonisasi (Konwar dkk., 2013)

### 2.8.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

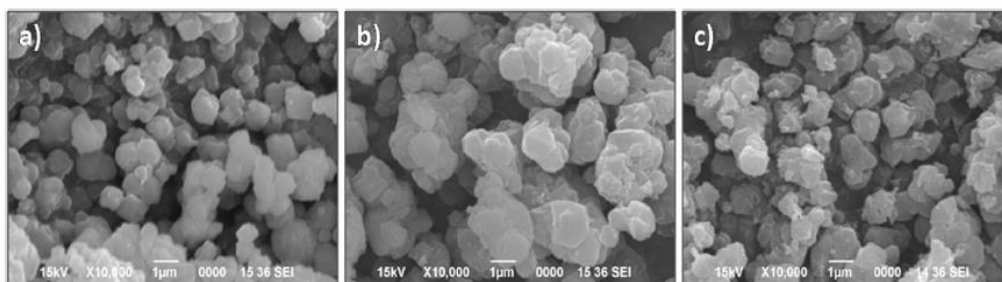
*Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan sejenis mikroskop yang menggunakan hamburan elektron sebagai pengganti cahaya dalam membentuk bayangan. Hamburan elektron selanjutnya berinteraksi dengan atom-atom yang membentuk sampel menghasilkan sinyal yang berisi topografi permukaan sampel, komposisi, dan sifat-sifat lain seperti konduktivitas listrik. (Mulder, 1996).

Prinsip kerja SEM dimulai dengan berkas elektron primer dengan energi kinetik 1-25 kV mengenai sampel yang akan dikarakterisasi. Setelah mengenai sampel, elektron tersebut direfleksikan. Elektron yang direfleksikan ini disebut dengan elektron sekunder. Selanjutnya elektron sekunder diperkuat sinyalnya, kemudian besar amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*Cathode Ray Tube*). Pada layar *micrograph* atau layar monitor CRT inilah gambar dapat teramati dan ditentukan (Mulder, 1996). Adapun analisa menggunakan SEM ini bermanfaat untuk mengetahui mikrostruktur (termasuk kerapatan ikatan dan bentuk retakan) dari benda padat. Berikut merupakan skema kerja alat SEM yang ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Skema kerja *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Konwar dkk., (2013), telah berhasil menunjukkan morfologi permukaan zeolit-NH<sub>4</sub>Y dalam berbagai tahapan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.20 bahwa, zeolit-NH<sub>4</sub>Y dan NH<sub>4</sub>Y-FA memiliki keseragaman morfologi partikel sama, yang menunjukkan struktur zeolit-NH<sub>4</sub>Y tetap tidak berubah oleh deposisi furfuril alkohol (FA). Namun ukuran partikel tampak lebih besar, yang mungkin disebabkan aglomerasi yang lebih tinggi setelah ditreatment dengan FA. Pada gambar komposit karbon/zeolit terlihat bahwa morfologinya seragam dalam mikro partikel.



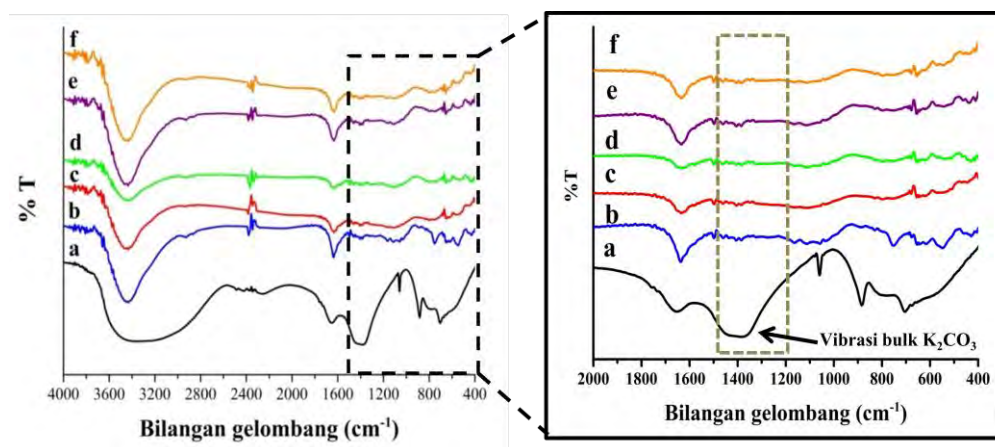
Gambar 2.20 (a) zeolit-NH<sub>4</sub>Y, (b) zeolit-NH<sub>4</sub>Y yang telah ditambahkan prekursor furfuril alkohol (FA), dan (c) komposit karbon/zeolit setelah proses karbonisasi pada suhu 650°C selama 4 jam (Konwar dkk., 2013)

### 2.8.3 *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Karbon tertemplat zeolit sebelum dan setelah aktivasi dikarakterisasi dengan FTIR untuk mengetahui gugus-gugus fungsi yang terdapat pada karbon tertemplat zeolit sebelum dan setelah aktivasi. Selain itu penggunaan FTIR juga

dapat digunakan untuk mengetahui interaksi ikatan yang terbentuk pada karbon tertemplat zeolit. Hal tersebut dapat diketahui dengan munculnya puncak karakteristik pada bilangan gelombang tertentu. Gugus-gugus fungsi yang terdapat pada karbon tertemplat zeolit teridentifikasi karena adanya vibrasi molekul setelah diberikan radiasi gelombang elektromagnetik berupa radiasi infra merah.

Berikut ini contoh spektra FTIR hasil penelitian Anggarini (2013) menggunakan karbon tertemplat zeolit sebelum dan setelah aktivasi  $K_2CO_3$ .



Gambar 2.21 Spektrum IR a)  $K_2CO_3$ ; b) Karbon tertemplat zeolit; c)  $K_2CO_3$ /Karbon = 0,5; d)  $K_2CO_3$ /Karbon = 1; e)  $K_2CO_3$ /Karbon = 1,5; f)  $K_2CO_3$ /Karbon = 2

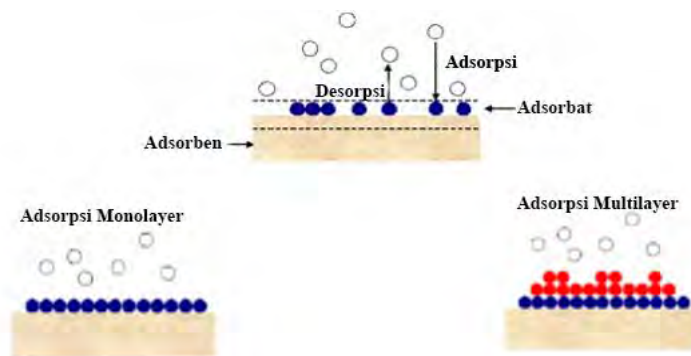
Gambar 2.21 (a) terlihat dua karakteristik puncak serapan  $K_2CO_3$  murni di daerah bilangan gelombang  $3368,91\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi gugus O-H dan puncak serapan di daerah  $1384,91\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi *bulk*  $K_2CO_3$ . Seluruh cuplikan karbon juga memiliki puncak di daerah  $3436\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi O-H yang diakibatkan beberapa uap air yang terperangkap di dalam pori karbon. Gambar 2.21 (b) adalah spektra IR cuplikan karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi yang menunjukkan puncak serupa dengan cuplikan karbon yang telah diaktivasi dengan  $K_2CO_3$  rasio 0,5 (Gambar 2.21 c), rasio 1 (Gambar 2.21 d), rasio 1,5 (Gambar 2.21 e), dan rasio 2 (Gambar 2.21 f) (Anggarini, 2013).

#### 2.8.4 Analisa adsorpsi gas (*gas sorption analysis*)

Metode analisis adsorpsi gas merupakan suatu metode analisa struktur pori pada permukaan material padatan. Karakterisasi menggunakan adsorpsi gas dapat diperoleh informasi mengenai densitas padatan (g/cc), prosentase porositas (%), volume pori atau distribusi ukuran pori, volume pori total (cc/g), ukuran pori rata-rata, luas permukaan spesifik, dan distribusi ukuran partikel. Proses adsorpsi gas melibatkan adanya adsorbat dan adsorben. Adsorbat merupakan suatu zat yang dapat teradsorpsi pada permukaan material padatan, sedangkan adsorben adalah zat yang dapat mengadsorpsi adsorbat. Pada umumnya adsorben sebagai objek yang akan dianalisis merupakan material padatan berpori seperti zeolit, karbon aktif, dan MOF. Gas yang dapat digunakan sebagai adsorbat yaitu nitrogen ( $N_2$ ), kripton (Kr), merkuri (Hg), dan karbon dioksida ( $CO_2$ ) (Sing dan Gregg, 1982).

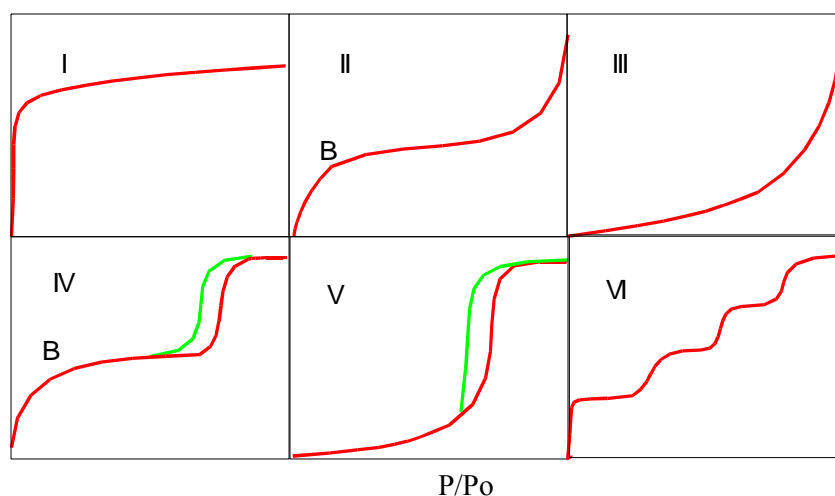
Proses adsorpsi berdasarkan gaya interaksi antara permukaan adsorben dengan adsorbat, diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu fisisorpsi dan kemisorpsi. Pada fisisorpsi terjadi adsorpsi fisik dan ikatan lemah antara adsorbat dengan adsorben. Adsorbat gas yang biasanya digunakan adalah nitrogen atau kripton, kedua gas ini biasa digunakan karena memiliki sifat inert yang tidak mempengaruhi hasil pengukuran. Adsorpsi berlangsung pada suhu rendah yaitu 77K dan tekanan vakum. Pada kondisi ini gas lebih mudah teradsorpsi pada permukaan material padatan (Sing dan Gregg, 1982).

Adsorpsi nitrogen melibatkan interaksi fisik molekul gas dengan permukaan sampel melalui gaya *van der Waals*. Pada fisisorpsi, gas inert dengan jumlah tertentu pada suhu rendah dan tekanan vakum diadsorpsi pada permukaan material berpori. Fisisorpsi ini tidak bergantung pada sifat dari sampel, tetapi bergantung pada luas permukaan dan struktur pori. Luas permukaan material yang dianalisa diukur dari jumlah molekul yang teradsorpsi pada lapisan *monolayer*. Sedangkan ukuran pori ditentukan oleh tekanan kondensasi (ukuran penguapan) gas dalam pori-pori. Molekul-molekul gas pada lapisan tunggal biasanya teradsorpsi akibat gaya tarik molekul gas dengan substrat. Sedangkan molekul gas pada lapisan *multilayer* teradsorpsi karena gaya tarik antar molekul-molekul gas.



Gambar 2.22 Proses adsorpsi *monolayer* dan *multilayer*

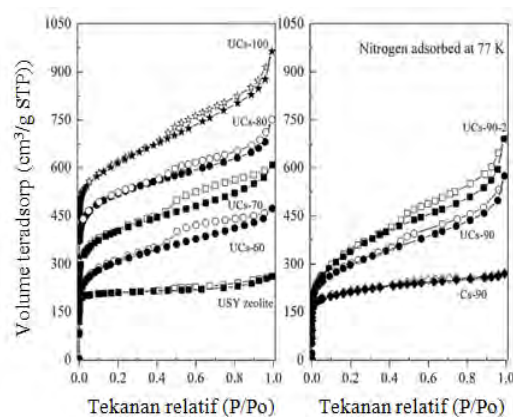
Dari hasil analisis adsorpsi gas, didapatkan grafik isoterm adsorpsi, yang diklasifikasikan menjadi beberapa tipe mulai dari tipe I sampai tipe VI, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.23. Tipe I merupakan ciri khas untuk padatan berpori dengan ukuran mikro dan proses adsorpsi berlangsung secara kemisorpsi. Tipe II pada umumnya untuk ukuran makropori dengan proses fisisorpsi dimulai dari titik B. Tipe III terjadi pada ukuran makropori dengan proses interaksi kohesi antar adsorbat. Tipe IV adalah pola isoterm adsorpsi untuk material mesopori, dimana pada tipe IV menunjukkan *loop hysteresis* oleh adanya kondensasi kapiler. Pada tipe V terjadi apabila interaksi antar molekul nitrogen lebih kuat dibandingkan interaksi nitrogen dengan padatan. Pada tipe V ini juga menunjukkan adanya *loop hysteresis* yang juga disebabkan oleh kondensasi kapiler pada mesopori. Pada tipe VI terjadi pada padatan tak berpori yang memiliki permukaan seragam (Adamson dan Gast, 1997).



Gambar 2.23 Tipe grafik isoterm adsorpsi-desorpsi gas (Sing dan Gregg, 1982)



Isoterm adsorpsi N<sub>2</sub> pada sukrosa/zeolit-USY dengan variasi suhu karbonisasi diperoleh luas permukaan hingga 1.281,6 m<sup>2</sup>/g (Cai dkk., 2014). Grafik yang dihasilkan menunjukkan tipe karbon yang mengikuti grafik isoterm tipe I yang menunjukkan luas permukaan relatif besar dengan struktur mikropori. Akan tetapi pada tekanan lebih tinggi muncul *loop hysteresis* yang mendukung adanya mesopori sempit dalam struktur zeolit. Sehingga terdapat kombinasi antara isoterm tipe I dan tipe II, yang menunjukkan bahwa karbon tidak hanya memiliki pori mikro tetapi sebagian meso atau makropori dengan celah seperti pori-pori yang mungkin disebabkan oleh infiltrasi prekursor ke saluran mikro zeolit.



Gambar 2.24 Adsorpsi (simbol hitam) dan desorpsi (simbol putih) isoterm untuk USY zeolit templat dan karbon berbasis sukrosa (Cai dkk., 2014)

Anggarini (2013), menganalisa karbon teremplat zeolit sebelum dan setelah aktivasi dengan isothermal adsorpsi N<sub>2</sub>, diperoleh sifat permukaan berikut.

Tabel 2.11 Sifat fisik permukaan karbon teremplat zeolit-Y

Sampel	Luas Permukaan BET (m <sup>2</sup> /gr)	Volume Pori Total (cc/gr)	Volume Mikropori (SF) (cc/gr)	Prosentase Mikropori (%)	Diameter Pori Rata-rata (BET) (nm)
Zeolit-NaY	686,818	0,404	0,341	84,441	2,353
Karbon teremplat zeolit-NaY	1.359,254	1,134	0,624	55,026	3,339
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Karbon teremplat zeolit-NaY= 1,5	1.441,335	1,145	0,697	60,873	3,177

Berdasarkan Tabel 2.11 menunjukkan bahwa luas permukaan karbon tertemplat zeolit setelah diaktivasi lebih tinggi hingga 1.441,335 m<sup>2</sup>/gr dibandingkan dengan zeolit-NaY (686,818 m<sup>2</sup>/gr) dan karbon tertemplat zeolit tanpa aktivasi (1.359,254 m<sup>2</sup>/gr). Selain itu volume mikropori juga terlihat meningkat hingga 0,697 cc/gr pada karbon tertemplat zeolit setelah aktivasi. Parameter luas permukaan dan struktur mikropori karbon sangat berperan dalam proses adsorpsi hidrogen.

#### 2.8.4.1 Brunauer-Emmet-Teller (BET)

*Brunauer-Emmett-Teller* (BET) menjelaskan adsorpsi fisik dari molekul gas terhadap permukaan adsorben. Informasi yang diperoleh dalam analisis BET antara lain luas permukaan suatu material yang dihubungkan melalui sifat adsorpsinya (Bansal dkk., 2005). Berikut ini adalah persamaan isothermal BET :

$$\frac{1}{v \left[ \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{c-1}{v_m \cdot c} \left( \frac{P}{P_0} \right) + \frac{1}{v_m \cdot c} \quad (2.17)$$

dimana V adalah jumlah gas yang teradsorp dalam satuan volume, V<sub>m</sub> adalah jumlah gas yang teradsorp dalam *monolayer*, P adalah tekanan adsorbat saat keadaan setimbang, P<sub>0</sub> adalah tekanan pada saat keadaan jenuh pada suhu adsorpsi tertentu, dan C adalah konstanta (tetapan).

Plot antara  $\frac{P}{V(P_0-P)}$  merupakan sumbu y, dan plot  $\frac{P}{P_0}$  merupakan sumbu x.

Berdasarkan plot tersebut akan dihasilkan persamaan garis lurus dengan gradient adalah  $\frac{c-1}{v_m c}$  dan *intercept* adalah  $\frac{1}{v_m c}$ , sehingga diperoleh nilai V<sub>m</sub> sebagai berikut:

$$V_m = \frac{1}{(\text{Intercept} + \text{slope})} \quad (2.18)$$

Luas permukaan total (S<sub>total</sub>) suatu materi diketahui melalui Persamaan 2.23.

$$S_{BET, total} = \left( \frac{v_m \cdot N \cdot S}{V} \right) \quad (2.19)$$

dimana, V<sub>m</sub> merupakan satuan volume molar dari adsorbat (gas). Sedangkan luas spesifik area permukaan dapat diketahui melalui Persamaan 2.24.

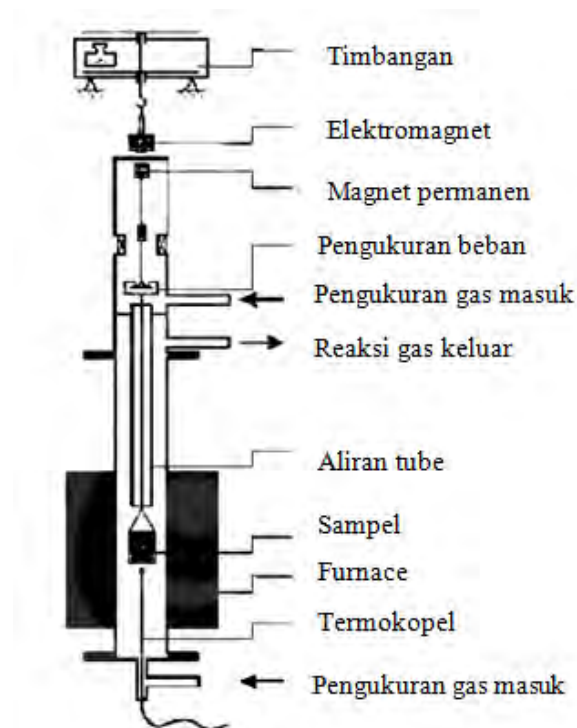
$$S_{BET} = \frac{S_{total}}{a} \quad (2.20)$$

dengan, N adalah bilangan avogadro, S adalah bagian penampang adsorpsi, V adalah volume molar adsorbat, dan a adalah massa adsorben (Bansal dkk., 2005).

## 2.9 Metode Pengukuran Kapasitas Penyimpanan Hidrogen

Terdapat empat metode pengukuran adsorpsi yaitu, metode *carrier gas*, metode volumetri, metode gravimetri, dan metode kalorimetri. Keempat metode tersebut telah digunakan di berbagai negara dan telah diakui secara internasional (Keller dkk., 2002). Dalam studi kapasitas penyimpanan hidrogen ini akan digunakan pengukuran adsorpsi menggunakan metode gravimetri.

Metode gravimetri digunakan untuk karakteristik pori-pori adsorben, mengukur persamaan adsorpsi gas, dan adsorpsi kinetik (Keller dkk., 2002). Pengukuran adsorpsi isothermal yang dapat dilakukan menggunakan metode gravimetri, antara lain massa yang terserap pada adsorben, tekanan gas, dan suhu. Alat untuk mengukur adsorpsi isothermal adalah *Thermograph Microbalance Aparatus* (TMA), seperti pada Gambar 2.21 (Rouquerol dkk., 1999).



Gambar 2.25 Skematik *Thermograph Microbalance Aparatus*

Preparasi sampel pengujian menggunakan metode gravimetri dilakukan dengan *degassing* sampel untuk mendapatkan massa kering sampel, suhu, tekanan, dan waktu untuk mendapatkan data pengujian yang valid (Keller dkk.,

2002). Timbangan pada sistem gravimetri mengukur resultan gaya yang bekerja seperti massa cuplikan dan gaya *bouyancy*. Gaya *bouyancy* terjadi disebabkan adanya perpindahan gas dan gaya yang terlibat pada gangguan mekanik maupun konveksi fluida. Derajat *bouyancy* sebanding dengan volume yang dipindahkan cuplikan dan densitas gas di sekelilingnya. Pengukuran gaya *bouyancy* dapat dilakukan menggunakan *pycometer* yang didasarkan pada densitas material. Pengukuran secara gravimetri dinyatakan dalam %berat sebagai berikut.

$$\%berat = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2.21)$$

dengan  $m_t$  adalah berat setelah sampel diadsorpsikan gas H<sub>2</sub>, sedangkan  $m_0$  adalah massa sampel awal.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Alat dan Bahan**

##### **3.1.1 Alat**

Peralatan yang digunakan untuk sintesis karbon tertemplat zeolit-Y dengan aktivasi  $K_2CO_3$  dalam penelitian ini meliputi krusibel *stainless steel*, reaktor hidrotermal (*autoclave stainless steel*), *tube furnace*, reaktor kuarsa (*muffle furnace*), pompa vakum, seperangkat alat refluks, *hot plate*, pengaduk magnetik, kertas saring, botol, dan gelas plastik (*polipropilena*). Karakterisasi material ini dilakukan menggunakan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen Quantachrome (*Autosorb iQ*) dan pengukuran kapasitas adsorpsi hidrogen menggunakan peralatan gravimetri.

##### **3.1.2 Bahan**

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain padatan natrium aluminat, larutan natrium silikat, air demineralisasi, pelet NaOH (99% p.a), sukrosa (98%, Fluka),  $H_2SO_4$  (98% p.a), gas  $N_2$  *high purity* (HP) (99,99%  $N_2$ ), HCl (37%, SAP), HF (48%, p.a),  $K_2CO_3$  (99,99%, p.a), dan gas hidrogen (UHP).

#### **3.2 Prosedur Kerja**

##### **3.2.1 Sintesis Zeolit-Y**

Pada penelitian ini, metode sintesis zeolit-Y sesuai dengan prosedur yang dilakukan oleh Kayadoe (2013) dan Anggarini (2013). Sintesis zeolit-Y diawali dengan penyiapan gel, lalu dilakukan proses hidrotermal. Pada penyiapan gel terdiri dari 3 tahap yaitu *seed gel*, *feedstock gel*, dan *overall gel*.

##### *a. Seed Gel*

Air demineralisasi sebanyak 23,991 g ditambahkan kedalam botol polipropilena 50 mL yang telah berisi 3,469 g natrium hidroksida dan 1,924 g

natrium aluminat, lalu diaduk menggunakan pengaduk magnetik sampai tercampur sempurna (homogen). Kemudian, 17,518 g natrium silikat ditambahkan ke dalam campuran tersebut, lalu diaduk perlahan selama kurang lebih 10 menit. Setelah pengadukan selesai, botol ditutup dan didiamkan (diperam) pada suhu ruang selama 24 jam.

*b. Feedstock Gel*

Air demineralisasi sebanyak 157,518 g ditambahkan kedalam botol polipropilena 500 mL yang telah berisi 0,100 g natrium hidroksida dan 13,851 g natrium aluminat, lalu diaduk menggunakan pengaduk magnetik sampai tercampur sempurna (homogen). Kemudian 107,212 g natrium silikat ditambahkan ke dalam campuran tersebut, lalu diaduk dengan kecepatan 600 rpm. Setelah gel yang terbentuk telah tercampur, kemudian gel tersebut ditutup hingga penambahan *seed gel*.

*c. Overall Gel*

*Seed gel* hasil sintesis sebanyak 16,500 g ditambahkan ke *feedstock gel* secara perlahan dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 600 rpm selama 20 menit. Campuran gel yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal (*autoclave stainless steel*) untuk proses kristalisasi dengan metode hidrotermal. Kemudian dilakukan pemeraman selama 24 jam pada suhu ruang. Selanjutnya dimasukkan ke dalam oven untuk proses hidrotermal pada suhu 100°C selama 7 jam dilakukan hidrotermal pada suhu 100°C selama 7 jam. Kemudian padatan zeolit-Y yang telah terbentuk disaring menggunakan pompa vakum dan selanjutnya dicuci dengan air demineralisasi hingga pH kurang dari 9. Selanjutnya dilakukan proses pengeringan pada suhu 110°C selama 12 jam (Robson dan Lillerud, 2001)

### **3.2.2 Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit-Y**

Pada penelitian ini, material karbon tertemplat zeolit disintesis menggunakan zeolit-Y hasil sintesis (rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 10,0$ ) sebagai templat dan sukrosa sebagai prekursor karbon. Proses sintesis material ini dilakukan dengan metode impregnasi yang terbagi menjadi 3 tahapan. Tahapan tersebut yaitu

impregnasi sukrosa pada zeolit-Y, karbonisasi templat, dan penghilangan templat zeolit dengan asam kuat (Ma dkk, 2002; Su dkk., 2004; dan Guan dkk., 2009).

#### Tahap 1. Impregnasi sukrosa pada zeolit-Y

Sebelum proses impregnasi, 10 g zeolit-Y dimasukkan ke dalam holder *stainless steel* yang telah di amplas hingga bersih. Kemudian dilakukan proses *degassing* terlebih dahulu dengan memasukkan holder *stainless steel* dalam *furnace tubular* pada suhu 200°C selama 4 jam (dengan laju peningkatan panas 1°C/menit). Selama proses *degass* suhu lingkungan dijaga dalam atmosfer nitrogen dengan cara membuka knop gas nitrogen yang terhubung dengan *furnace tubular*. Hal tersebut dilakukan agar lingkungan pada *furnace tubular* dijaga dalam atmosfer nitrogen. Setelah mencapai suhu 200°C selama 4 jam, *furnace tubular* secara otomatis akan mengalami pendinginan hingga suhu ruang dalam atmosfer nitrogen. Saat suhu pada furnace tubular telah menunjukkan suhu ruang, selanjutnya sebanyak 12,500 g sukrosa ditimbang dan dilarutkan dalam 50 mL asam sulfat 0,35 M. Zeolit-Y hasil *degassing* dikeluarkan dari furnace tubular dan secara perlahan dimasukkan ke dalam campuran sukrosa. Kemudian diaduk dengan kecepatan 250 rpm selama 72 jam pada suhu ruang.

#### Tahap 2. Karbonisasi templat

Campuran yang diperoleh pada tahap 1, terlebih dahulu disaring dan residu digunakan untuk tahap 2. Sebelum dilakukan proses karbonisasi templat, holder *stainless steel* di amplas hingga bersih. Kemudian holder *stainless steel* yang telah berisi sampel dimasukkan ke dalam *furnace tubular* untuk proses karbonisasi. Adapun proses karbonisasi dilakukan pada suhu 800°C selama 4 jam dibawah aliran N<sub>2</sub> dengan laju pemanasan 2°C/menit dan laju alir 30 cm<sup>3</sup>/menit.

#### Tahap 3. Penghilangan templat zeolit

Komposit karbon/zeolit yang diperoleh pada tahap 2, selanjutnya direndam dalam HF 5% selama 1 jam, lalu dibilas dengan air demineralisasi panas beberapa kali hingga diperoleh filtrat dengan pH netral. Padatan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 12 jam. Pencucian karbon



dilanjutkan dengan merefluks karbon. Sebanyak 5 g karbon direndam dalam 30 mL HCl 37% dan direfluks pada suhu 60°C selama 1 jam. Karbon hasil refluks kemudian disaring dan dicuci dengan air demineralisasi beberapa kali hingga diperoleh pH netral. Selanjutnya karbon dikeringkan dalam oven pada suhu 120°C selama 12 jam. Pencucian tahap ketiga dilakukan dengan merendam karbon ke dalam larutan HF 48% selama 1 jam. Karbon yang telah direndam kemudian dicuci dengan air demineralisasi panas beberapa kali hingga diperoleh filtrat dengan pH netral. Karbon tersebut lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 120°C selama 12 jam. Karbon yang telah dihasilkan merupakan karbon tertemplat zeolit yang selanjutnya digunakan untuk proses aktivasi dengan  $K_2CO_3$ .

### **3.2.3 Aktivasi Karbon Tertemplat Zeolit dengan $K_2CO_3$**

Pada penelitian ini, aktivasi karbon dilakukan secara kimia menggunakan  $K_2CO_3$  sesuai prosedur yang dilakukan oleh Angarini (2013). Karbon tertemplat zeolit yang telah disintesis kemudian dicampurkan dengan  $K_2CO_3$  (rasio impregnasi  $K_2CO_3$ /karbon = 1,5) dan dilarutkan dalam 20 mL aquades sambil diaduk dengan kecepatan 200 rpm selama 5 jam. Selanjutnya terlebih dahulu campuran disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C sebelum dilakukan proses karbonisasi. Karbon yang telah diimpregnasi dengan  $K_2CO_3$  kemudian dikarbonisasi pada suhu 800°C dengan waktu *holding* 1 jam dalam *furnace tubular* dibawah aliran  $N_2$  (laju alir 30 cm<sup>3</sup>/menit) dan laju pemanasan 3°C/menit. Setelah proses karbonisasi, karbon yang telah diaktivasi didinginkan hingga suhu ruang dengan tetap dialiri gas nitrogen. Karbon kemudian direndam dalam HCl 2 M selama 1 jam untuk menghilangkan beberapa garam anorganik, dan dilanjutkan dengan pencucian menggunakan air demineralisasi panas untuk mereduksi kalium dan air demineralisasi dingin hingga diperoleh pH netral. Karbon setelah proses pencucian dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C selama 12 jam (Sevilla dkk., 2010).

### 3.2.4 Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit Sebelum dan Setelah Aktivasi dengan $K_2CO_3$

Zeolit-Y hasil sintesis dikarakterisasi dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengkonfirmasi pembentukan struktur kristal zeolit dengan standar. Karbon tertemplat zeolit hasil sintesis dikarakterisasi dengan XRD untuk mengidentifikasi fasa kristal dan kristalinitasnya, serta SEM untuk membandingkan morfologi permukaan karbon tertemplat zeolit dengan zeolit hasil sintesis.

Setelah proses pencucian karbon hasil aktivasi dikarakterisasi dengan XRD untuk melihat pembentukan struktur pada karbon teraktivasi, serta SEM untuk membandingkan morfologi permukaan material sebelum dan setelah proses aktivasi dengan  $K_2CO_3$ .

Karakterisasi pori zeolit-Y dilakukan pada sampel karbon tertemplat zeolit, karbon tertemplat zeolit yang telah diaktivasi dengan rasio  $K_2CO_3$ /karbon 1,5 sebelum dan setelah mengadsorp hidrogen.. Uji karakterisasi pori ketiga sampel tersebut menggunakan metode isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen dengan *Quantachrome Autosorb ASiQwin (Autosorb iQ)* . Luas permukaan pada sampel karbon tertemplat zeolit, karbon tertemplat zeolit aktivasi  $K_2CO_3$  sebelum dan setelah mengadsorp hidrogen dapat ditentukan menggunakan persamaan *Brunauer-Emmett-Teller* (BET), distribusi ukuran pori ditentukan dengan persamaan *Barret-Halenda-Joiner* (BJH), *Saito-Foley* (SF) dan *Horvath and Kavazoe* (HK).

Karakterisasi spektroskopi inframerah dilakukan pada  $K_2CO_3$  murni, karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi, karbon yang telah diaktivasi dengan rasio  $K_2CO_3$ /karbon 1,5 sebelum dan setelah mengadsorp hidrogen. Karakterisasi dengan FTIR dilakukan untuk mengkarakterisasi gugus fungsi di permukaan material sebelum dan setelah mengadsorp hidrogen, serta untuk mengetahui hilangnya garam sisa  $K_2CO_3$  dalam sampel karbon setelah proses pencucian.

### 3.3 Studi Adsorpsi Hidrogen

#### 3.3.1 Penentuan Kapasitas Adsorpsi Hidrogen

Pengujian kapasitas adsorpsi hidrogen dilakukan menggunakan metode gravimetri. Metode ini dilakukan dengan mengamati perubahan berat sampel sebelum dan sesudah dialiri gas hidrogen. Alat yang digunakan untuk pengujian kapasitas penyimpanan hidrogen berupa serangkaian alat yang terdiri atas *tube furnace*, timbangan analitik, pompa vakum, *mass flow control* (MFC), *sample holder* dan tabung gas hidrogen sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan 3.2.

Pengujian adsorpsi hidrogen dilakukan pada cuplikan karbon teremplat zeolit sebelum dan setelah proses aktivasi. Sampel karbon teraktivasi hasil sintesis diambil 3 gram lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam. Cuplikan kemudian didinginkan hingga suhu ruang dan disimpan dalam desikator untuk proses sterilisasi.

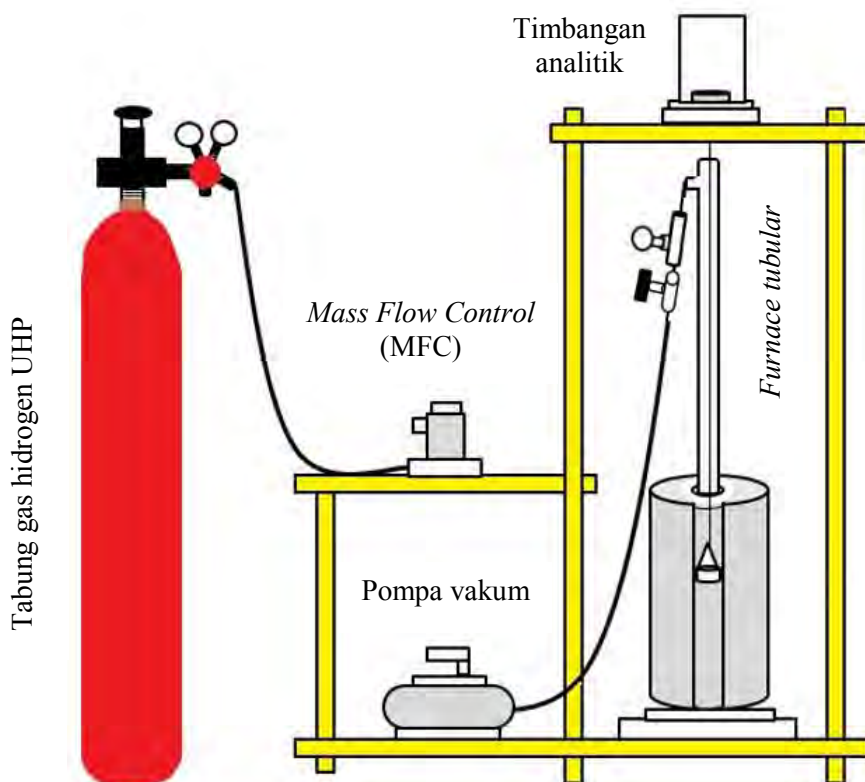
Untuk menguji kapasitas adsorpsi hidrogen, cuplikan yang telah dikeringkan kemudian ditimbang sebanyak 0,2-0,3 gram untuk masing-masing pengukuran dan diletakkan dalam reaktor baja (*stainless chamber*) yang telah steril (Li dan Yang, 2006). Sebelum dilakukan proses adsorpsi, sampel terlebih dahulu di *degass*. Proses *degassing* dilakukan menggunakan *furnace tubular* yang telah terhubung pada pompa vakum. Selanjutnya *furnace tubular* dinyalakan dan diatur suhu pemanasan 350°C selama 3 jam dalam kondisi vakum. Setelah mencapai suhu yang ditentukan, *furnace tubular* kemudian dimatikan dan dibiarkan hingga suhu sistem mencapai suhu ruang. Berat sampel diamati dan dicatat sebagai berat awal sebelum proses adsorpsi hidrogen ( $m_0$ ) sampai tercapai berat konstan. Setelah mencapai suhu ruang, proses adsorpsi dilakukan dengan membuka knop tabung gas  $H_2$  yang telah dihubungkan dengan reaktor gelas dibuka hingga gas  $H_2$  dapat mengalir secara perlahan. Adapun pada saat proses adsorpsi, aliran gas hidrogen diatur konstan 20 mL/menit dengan *mass flow control* (MFC). Tekanan yang digunakan dapat diatur dengan memutar knop tabung gas hidrogen sesuai dengan tekanan yang diinginkan. Penyerapan hidrogen dilakukan pada tekanan rendah (Sivakumar, 1999 dan Sivakumar 2000). Pengamatan proses adsorpsi dilakukan terhadap perubahan berat yang terjadi

setiap 1 menit hingga diperoleh berat konstan. Berat konstan ini dicatat sebagai berat akhir setelah proses adsorpsi ( $m_t$ ). Setelah diperoleh berat konstan, knop tabung gas hidrogen ditutup sehingga tidak ada aliran gas hidrogen yang masuk ke dalam reaktor dan tekanan dalam sistem diukur menggunakan *pressure gauge*. Pada penelitian ini suhu yang digunakan yaitu 30, 40 dan 50°C dengan variasi tekanan sebesar 1; 1,5; 2 dan 3 bar. Adapun perhitungan kapasitas adsorpsi hidrogen dihitung dengan Persamaan (3.1).

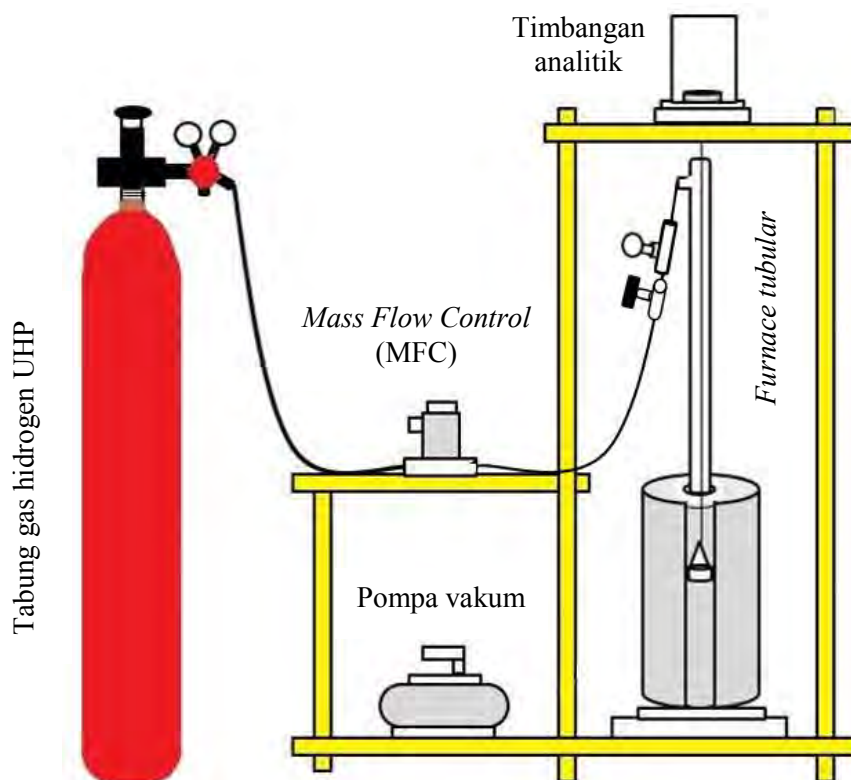
$$\%H_2 = \frac{(m_t - m_o)}{m_o} \times 100\% \quad (3.1)$$

dimana :  $m_t$  = massa sampel setelah mengadsorp gas  $H_2$  (gram)

$m_o$  = massa sampel awal (gram)



**Gambar 3.1** Skema alat uji adsorpsi hidrogen pada proses *degassed*



**Gambar 3.2** Skema alat uji adsorpsi hidrogen pada proses adsorpsi

### 3.3.2 Penentuan Isoterm Adsorpsi

Studi adsorpsi dilakukan pada suhu 30, 40 dan 50°C serta variasi tekanan sebesar 1; 1,5; 2; dan 3 bar. Pada tiap variasi suhu tertentu, jumlah terserap gas adalah fungsi tekanan (Delavar, 2012). Dalam penentuan jenis adsorpsi, data yang diperoleh dari kapasitas adsorpsi hidrogen pada konsentrasi setimbang digunakan untuk menentukan model isoterm adsorpsi. Persamaan isoterm adsorpsi dihitung menggunakan beberapa model isoterm pada sub bab 2.7.1 di Bab 2.

### 3.3.3 Penentuan Termodinamika Adsorpsi

Penentuan termodinamika adsorpsi dilakukan dengan menggunakan tiga variasi suhu yang berbeda antara lain 30, 40 dan 50°C. Pada penentuan termodinamika adsorpsi, akan didapatkan data berupa kapasitas adsorpsi pada tiap suhu, serta data tekanan pada system dalam tiap variasi suhu yang berbeda. Data yang diperoleh selanjutnya dapat dihitung menggunakan persamaan termodinamika pada sub bab 2.7.3 di Bab 2.

## **BAB 4**

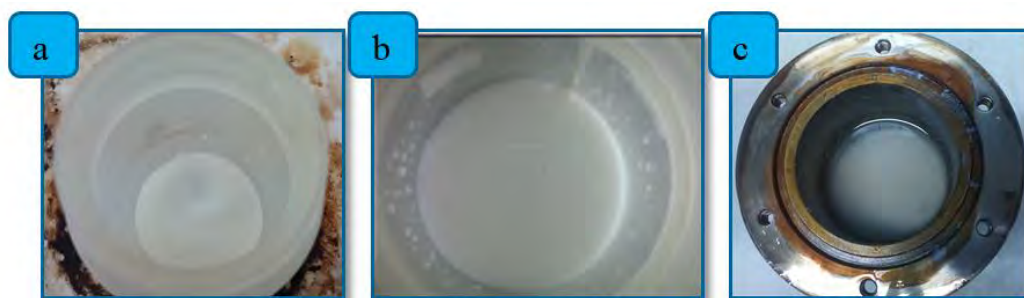
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian ini, adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit yang dimodifikasi dengan  $K_2CO_3$  dilakukan dalam beberapa tahapan. Pada tahap pertama dilakukan sintesis zeolit-Y yang diawali dengan penyiapan gel, kemudian dilakukan proses hidrotermal. Tahap kedua, zeolit-Y yang telah terbentuk kemudian dijadikan templat untuk membentuk karbon tertemplat zeolit. Karbon tertemplat zeolit disintesis dengan metode impregnasi disertai karbonisasi sederhana menggunakan sukrosa sebagai prekursor karbon dan zeolit-Y sebagai templat. Tahap ketiga, karbon tertemplat zeolit hasil sintesis kemudian diaktivasi secara kimia dengan  $K_2CO_3$  pada rasio optimum  $K_2CO_3$  (gr)/ karbon (gr) sebesar 1,5 sesuai dengan penelitian Anggarini (2013). Tahap selanjutnya, padatan hasil sintesis karbon tertemplat zeolit sebelum dan setelah proses aktivasi dengan  $K_2CO_3$  dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *N<sub>2</sub> Gas Sorption Analysis* (Analisis Adsorpsi Gas) dengan metode BET (*Brenauer-Emmet-Teller*) untuk menentukan luas permukaan spesifik, metode BJH (*Barret, Joiner, Halenda*) untuk menentukan distribusi ukuran pori meso, serta metode SF (*Saito Foley*) dan HK (*Horvath Kavazoe*) digunakan untuk menentukan distribusi ukuran pori mikro. Uji adsorpsi hidrogen dilakukan pada material hasil sintesis menggunakan metode gravimetri dengan variasi waktu, suhu, dan tekanan.

#### **4.1 Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-Y**

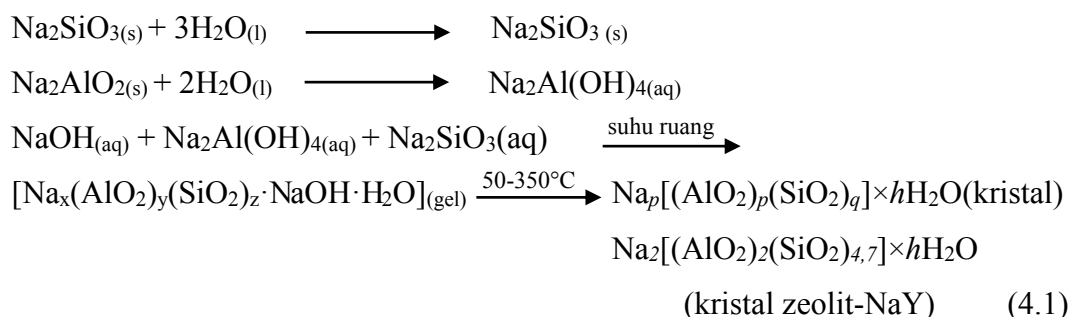
Sintesis karbon tertemplat zeolit-Y diawali dengan melakukan sintesis zeolit-Y sebagai templat sesuai dengan prosedur yang telah dilakukan Kayadoe (2013) dan Anggarini (2013). Kayadoe (2013) telah melakukan optimasi sintesis zeolit-Y dengan rasio penambahan *feedstock gel* terhadap *seed gel* dengan perbandingan optimum yaitu 18:1. Sintesis zeolit-Y dalam penelitian ini dilakukan dengan rasio optimum melalui beberapa tahapan yang terdiri dari pembuatan *seed gel*, *feedstock gel* dan *overall gel*. Pembuatan gel sintesis zeolit-Y

menggunakan beberapa reagen diantaranya yakni  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , dan  $\text{NaOH}$ . Pada proses pembuatan *seed gel* dilakukan pemeraman selama 1 hari pada suhu ruang, selanjutnya dimasukkan secara perlahan ke dalam *feedstock gel* untuk membentuk *overall gel*. Adapun hasil pembuatan ketiga gel tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. *Overall gel* yang dihasilkan berwarna putih keruh, kemudian gel tersebut direaksikan dalam *autoclave stainless steel* yang tertutup rapat untuk menjaga suhu dan tekanan agar tetap konstan saat proses hidrotermal.



Gambar 4.1 a) *Seed gel*, b) *Feedstock gel*, dan c) *Overall gel* setelah proses hidrotermal

Proses sintesis zeolit-Y ini menggunakan metode hidrotermal pada suhu  $100^\circ\text{C}$ , yaitu suhu yang terjadi pertumbuhan kristal zeolit-Y secara cepat, sehingga dihasilkan kristal yang berukuran besar (Sang dkk., 2006). Menurut Sang dkk., (2006), suhu hidrotermal rendah ( $40^\circ\text{C}$ ) menghasilkan padatan amorf yang menandakan bahwa zeolit-Y belum terbentuk, sedangkan suhu hidrotermal tinggi ( $120^\circ\text{C}$ ) akan cenderung menghasilkan zeolit-P daripada zeolit-Y. Menurut Ojha dkk., (2004) peleburan alkali dengan perlakuan hidrotermal merupakan metode yang paling tepat untuk mendapatkan faujasit (zeolit-X dan zeolit-Y). Adapun persamaan reaksi yang terjadi pada proses pembentukan gel zeolit secara umum sebagai berikut (Ojha dkk., 2004).



Pada akhir proses hidrotermal diperoleh larutan zeolit-Y yang berwarna bening dan padatan putih yang merupakan zeolit-Y. Padatan tersebut dipisahkan dari filtratnya dengan cara disaring menggunakan alat filtrasi vakum, selanjutnya padatan dicuci dengan air destilat hingga pH kurang dari 9. Proses pencucian dilakukan untuk menghilangkan pengotor yang terdapat dalam zeolit-Y. Kemudian padatan zeolit-Y dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 12 jam untuk menghilangkan kandungan air di dalam zeolit-Y tersebut. Padatan zeolit-Y yang diperoleh berwarna putih berbentuk serbuk halus, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Padatan hasil sintesis tersebut selanjutnya dikarakterisasi menggunakan beberapa instrumen.

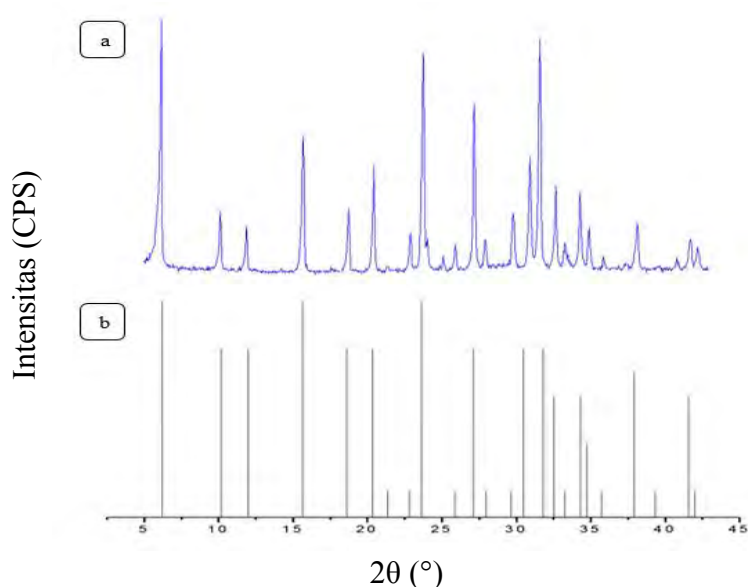


Gambar 4.2 Padatan zeolit-Y hasil sintesis

Karakterisasi zeolit-Y menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) bertujuan untuk mengetahui puncak-puncak karakteristik yang mengindikasikan pembentukan kristal zeolit-Y hasil sintesis. Hasil karakterisasi ini juga digunakan untuk mengetahui ada atau tidaknya fase lain yang terbentuk dari padatan zeolit-Y. Difraktogram yang diperoleh dari hasil sintesis kemudian dicocokkan dengan difraktogram standar zeolit-Y, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Berdasarkan Gambar 4.3 (a) difraktogram hasil sintesis menunjukkan adanya puncak difraksi yang khas pada  $2\theta = 6,2^\circ$  [111],  $10,1^\circ$  [220],  $11,8^\circ$  [311],  $20,2^\circ$  [440],  $23,5^\circ$  [533],  $26,9^\circ$  [642],  $30,5^\circ$  [822],  $31,2^\circ$  [555], dan  $32,2^\circ$  [840]. Puncak-puncak difraksi zeolit-Y hasil sintesis sesuai dengan puncak-puncak zeolit-Y standar JCPDS No.11-0672 Tahun 2011, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 (b). Pada zeolit-Y hasil sintesis diperoleh kristal zeolit dengan keteraturan yang tinggi, yang dibuktikan dengan adanya puncak tinggi yang khas pada  $2\theta = 6^\circ$  [111]. Pola difraktogram zeolit-Y hasil sintesis ini tidak menunjukkan adanya



puncak lain selain puncak karakteristik zeolit-Y, hal ini mengindikasikan bahwa zeolit-Y telah berhasil disintesis tanpa ada fasa lain yang terbentuk. Pola difraksi tersebut memiliki kesesuaian dengan penelitian yang telah dilaporkan oleh Guan dkk., (2009); Alam dan Mokaya (2011); dan Cai dkk., (2014). Zeolit-Y hasil sintesis juga dicocokkan menggunakan *software Match*. Pola difraksi sampel zeolit-Y hasil sintesis dibandingkan dengan pola difraksi zeolit-Y yang terdapat pada database, kemudian diperoleh prosentase kecocokan zeolit-Y hasil sintesis sebesar 87,71%.



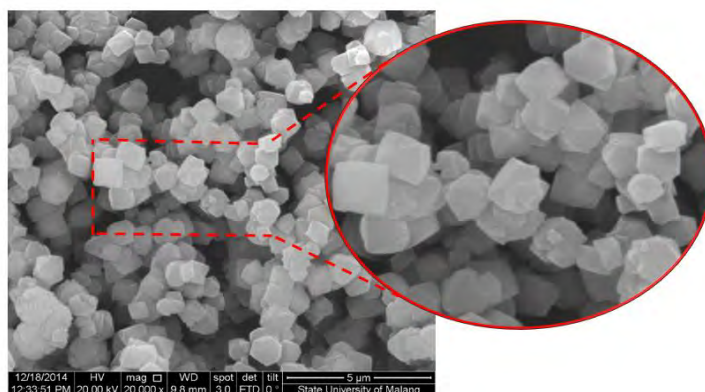
Gambar 4.3 (a) Pola XRD Zeolit-Y hasil sintesis dan (b) standar zeolit-Y ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{13,4} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) JCPDS No.11-0672

Pada zeolit-Y hasil sintesis, puncak khas di  $2\theta = 6^\circ$  memiliki intensitas sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa zeolit-Y yang terbentuk memiliki kristalinitas yang tinggi. Ukuran kuantitatif dari kristalinitas zeolit-Y hasil sintesis dapat dihitung menggunakan intensitas yang dihasilkan oleh puncak-puncak utama dalam pola difraksi sinar-X (Ojha dkk., 2004). Kristalinitas zeolit-Y diukur dengan cara menghitung jumlah total intensitas relatif 10 puncak utama karakteristik zeolit-Y hasil sintesis dibandingkan dengan jumlah total intensitas relatif zeolit-Y standar. Prosentase kristalinitas dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.2.

$$\% \text{ kristalinitas} = \frac{\sum \text{intensitas relatif zeolit-Y hasil sintesis}}{\sum \text{intensitas relatif zeolit-Y standar}} \times 100\% \quad (4.2)$$

Berdasarkan hasil perhitungan data menggunakan Persamaan 4.2 menunjukkan bahwa zeolit-Y hasil sintesis memiliki prosentase kristalinitas sebesar 68,953%.

Morfologi partikel padatan zeolit-Y diamati dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Mikrograf SEM zeolit-Y hasil sintesis berbentuk kristal oktahedral dan bertumpuk-tumpuk (*agglomerat*) dengan ukuran partikel antara 0,5-0,8  $\mu\text{m}$ . Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Alam dan Mokaya (2011) serta Anggarini (2013), yang telah mengkonfirmasi pembentukan zeolit-Y. Zeolit-Y hasil sintesis yang telah diperoleh selanjutnya digunakan sebagai templat atau cetakan pada sintesis karbon tertemplat zeolit.



Gambar 4.4 Mikrograf representatif SEM zeolit-Y

Karbon tertemplat zeolit pada penelitian ini disintesis dengan zeolit-Y sebagai templat dan sukrosa sebagai prekursor karbon. Tahapan dalam sintesis karbon tertemplat zeolit terdiri dari tiga tahap, sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kayadoe (2013) dengan rasio penambahan sukrosa/zeolit sebesar 12,5:10.

Tahap pertama pada sintesis karbon tertemplat zeolit yakni prekursor karbon sukrosa dimasukkan ke dalam zeolit-Y melalui metode impregnasi. Sebelum dilakukan proses impregnasi, terlebih dahulu sampel didegassing pada suhu 200°C untuk menghilangkan gas yang mengisi pori-pori zeolit, agar molekul sukrosa lebih mudah masuk ke dalam pori zeolit. Kemudian zeolit-Y diimpregnasi dengan larutan sukrosa yang dibuat dengan melarutkan sukrosa dalam  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,35M. Hal ini bertujuan untuk mengubah sukrosa menjadi karbon (Cai dkk.,

2014). Impregnasi dilakukan selama 72 jam dengan kecepatan 250rpm pada suhu ruang. Selama proses impregnasi tersebut, larutan karbon mengisi pori dan kerangka zeolit-Y. Setelah proses impregnasi selesai diperoleh larutan berwarna putih, kemudian padatan dipisahkan dari filtratnya dengan alat filtrasi vakum hingga diperoleh gel putih yang pekat seperti lem. Gel tersebut dimasukkan dalam wadah *stainless steel* untuk dilakukan proses karbonisasi. Proses pada tahapan pertama seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Tahap impregnasi sukrosa dalam zeolit-Y hingga dihasilkan gel

Tahap kedua yakni proses polimerisasi yang diikuti dengan karbonisasi suhu tinggi pada campuran zeolit-Y dan sukrosa untuk menghasilkan komposit karbon/zeolit-Y. Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 800°C dibawah kondisi inert dengan aliran gas  $N_2$ . Gas nitrogen digunakan untuk mencegah terjadinya reaksi pembakaran sempurna antara karbon dan oksigen yang dapat mengakibatkan hilang atau rusaknya struktur pori karbon yang telah terbentuk. Pada saat proses karbonisasi, bahan dasar karbon terdekomposisi dan material volatil terlepas, sehingga secara bersamaan terbentuk struktur karbon berpori. Kayadoe (2013) menjelaskan bahwa mekanisme pembentukan pori sukrosa terjadi melalui proses dekomposisi yang dimulai pada suhu 180°C dan dipertahankan hingga suhu 800°C melalui karbonisasi untuk membentuk karbon yang stabil secara termal, menghilangkan pengotor berupa komponen volatil serta secara bersamaan akan terbentuk pori saat hilangnya material volatil tersebut. Penelitian Cai dkk., (2014) menyebutkan bahwa suhu karbonisasi yang lebih tinggi dan jumlah aditif sukrosa berlebih dapat menghasilkan material karbon dengan luas permukaan yang lebih tinggi. Namun peningkatan luas permukaan tersebut

disertai dengan peningkatan diameter pori yang lebih besar. Pori yang lebih besar terbentuk dari runtuhnya pori selama proses etsa. Hal ini memungkinkan bahwa ikatan sukrosa dengan partikel karbon tidak cukup stabil untuk mempertahankan kerangka karbon setelah templat dihapus. Suhu karbonisasi lebih dari 850°C menyebabkan diameter pori yang berukuran lebih besar (20-80 nm) meningkat dan pori berukuran kurang dari 6 nm menurun. Begitu pula sebaliknya pada suhu karbonisasi kurang dari 850°C, hampir semua pori berukuran kurang dari 6 nm (Konwar dkk., 2013). Menurut Su dkk., (2004), suhu karbonisasi yang lebih tinggi memungkinkan terjadinya pembengkakan mikropartikel karbon dan derajat infiltrasi karbon pada *framework* zeolit menjadi tidak dapat terisi penuh oleh karbon, sehingga membentuk pori dengan ukuran mikropori  $\pm 1,8$  nm dan mesopori lebih besar dari 2,0 nm setelah zeolit dihilangkan melalui pencucian. Setelah proses karbonisasi selesai diperoleh komposit karbon/zeolit, dimana karbon berpori memiliki morfologi sesuai dengan templat zeolit-Y. Padatan hasil karbonisasi komposit karbon/zeolit seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.6.

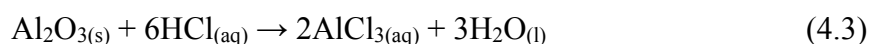


Gambar 4.6 Komposit karbon/zeolit setelah karbonisasi pada suhu 800°C

Tahap ketiga ialah penghilangan templat zeolit, yang dilakukan dengan mencuci komposit karbon/zeolit dengan asam secara bertahap. Hal ini disebabkan kerangka zeolit-Y terdiri dari Si-O-Al-O-Si yang saling terhubung dalam beberapa unit bangun sekunder, sehingga untuk menghilangkan *framework* zeolit dibutuhkan HF untuk menghilangkan Si (Su dkk., 2004) dan HCl untuk menghilangkan Al (Kovo, 2011). Pada penelitian ini mula-mula proses pencucian komposit karbon/zeolit menggunakan HF 5% yang bertujuan untuk memecah ikatan Si-O-Al pada kerangka zeolit-NaY. Penggunaan konsentrasi HF yang rendah dilakukan agar proses penghilangan templat selanjutnya lebih mudah dan

cepat. Setelah dilakukan pencucian, komposit karbon/zeolit dipisahkan antara padatan dan filtratnya, lalu dicuci dengan aqua DM panas. Mula-mula filtrat yang didapatkan dari hasil pencucian dengan HF menghasilkan pH 1. Pencucian dilakukan secara berulang hingga didapatkan pH netral yang menandakan silika telah hilang dari kisi zeolit. Kemudian sampel yang diperoleh dikeringkan untuk menghilangkan kandungan air di dalamnya.

Sampel setelah proses pengeringan, kemudian dicuci menggunakan HCl 37% dengan metode refluks pada suhu 60°C untuk menghilangkan aluminium dari kisi zeolit. Pencucian dengan HCl melibatkan reaksi dealuminasi, dimana HCl dan alumina akan membentuk garam  $\text{AlCl}_3$ , seperti ditunjukkan pada Persamaan 4.3 (Kovo, 2011). Komposit karbon/zeolit yang telah dicuci dengan HCl, kemudian disaring dan dicuci dengan aqua DM hingga pH netral. Adapun pH awal yang dihasilkan pada pencucian dengan HCl adalah pH 0. Setelah sampel memiliki pH netral kemudian dikeringkan untuk menghilangkan kandungan air di dalamnya.



Pencucian terakhir pada sampel dilakukan menggunakan HF 48% untuk menghilangkan silika dari *framework* zeolit. Penggunaan larutan HF dalam konsentrasi tinggi bertujuan untuk melarutkan silika pada zeolit-Y dalam jumlah besar. Hal ini disebabkan unsur fluorin memiliki elektronegativitas yang sangat kuat dibandingkan unsur halogen lainnya. Pada proses pencucian ini, komposit karbon/zeolit yang mengandung unsur silikat bereaksi dengan larutan HF 48% untuk membentuk larutan yang mengandung fluorosilikat, seperti ditunjukkan pada Persamaan 4.4 (Cotton dkk., 2009).



Sampel hasil pencucian dengan HF 48% menghasilkan pH awal 0, kemudian sampel tersebut dicuci dengan aqua DM panas hingga diperoleh pH netral. Sampel karbon yang telah memiliki pH netral selanjutnya dikeringkan untuk menghilangkan kandungan air. Setelah proses pengeringan diperoleh padatan

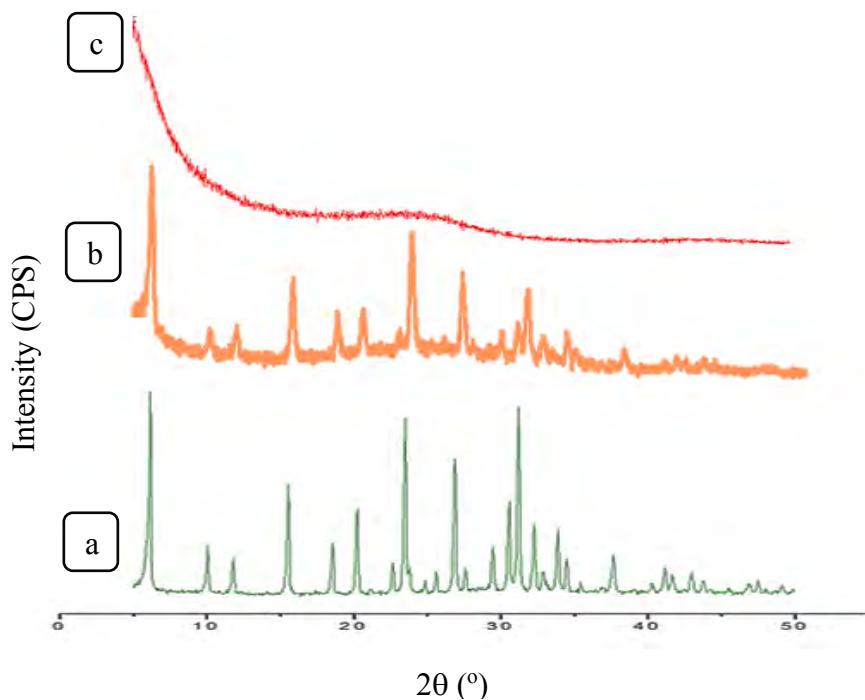
berwarna hitam sebagai karbon tertemplat zeolit, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Karbon tertemplat zeolit-Y

Karbon tertemplat zeolit-Y yang diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan XRD untuk mengkonfirmasi hilangnya templat zeolit-Y dan mengetahui keteraturan struktur karbon yang dibentuk. Difraktogram karbon tertemplat zeolit-Y dibandingkan dengan difraktogram komposit karbon/zeolit dan difraktogram zeolit-Y hasil sintesis. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hilangnya templat zeolit-Y dan mengetahui keteraturan karbon ketika memasuki struktur pori zeolit. Pola difraksi ketiga sampel tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Pada Gambar 4.8 (b) terlihat bahwa komposit karbon/zeolit mempunyai puncak-puncak karakteristik zeolit-Y, dengan intensitas puncak tertinggi terdapat pada  $2\theta = 6^\circ$  [111] (Su dkk., 2004; Chen dkk., 2007; Alam dan Mokaya, 2011). Hal tersebut menunjukkan bahwa karbon telah memasuki struktur pori zeolit tanpa merubah atau merusak struktur kristal zeolit-Y. Adapun difraktogram karbon tertemplat zeolit seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8 (c), menunjukkan adanya puncak tinggi di  $2\theta = 6^\circ$  seperti dinyatakan oleh Alam dan Mokaya (2011). Hasil ini mengindikasikan keteraturan karbon yang dibentuk mengikuti karakteristik zeolit-Y. Selain itu pada karbon tertemplat zeolit terdapat puncak berbentuk gundukan yang berpusat pada daerah sudut  $2\theta = 25^\circ$ . Gundukan ini menandai bidang difraksi [002] yang sangat lemah dengan puncak melebar (*hump*) pada  $2\theta \sim 25^\circ$  (Guan dkk., 2009). Pemusatan gundukan yang melebar (*hump*) pada bidang [002] adalah karakteristik dari karbon grafitik dengan nilai jarak antar lapisan sebesar 0,342 nm, nilai ini lebih besar daripada potongan jarak antar lapisan grafit yaitu 0,335 nm (García, et al., 2013).

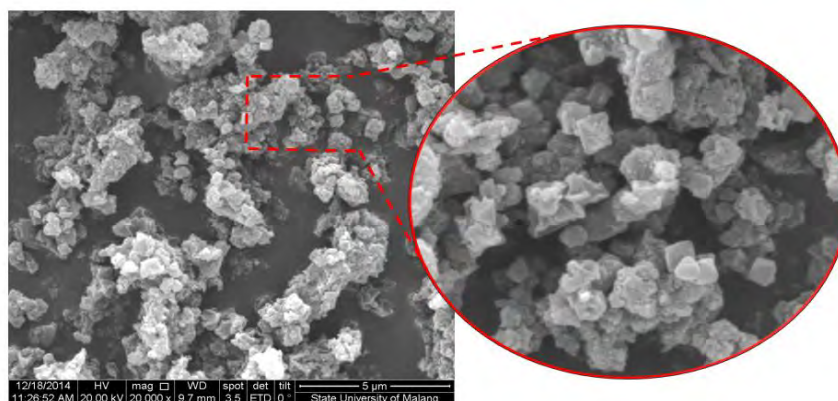


Gambar 4.8 Pola difraktogram (a) zeolit-Y hasil sintesis, (b) komposit karbon/zeolit, dan (c) karbon tertemplat zeolit

Terjadinya grafitisasi disebabkan adanya sejumlah derivat sukrosa yang mengalami kondensasi oleh dirinya sendiri (*self-condensation*) dan berlokasi pada bagian luar misel templat zeolit-Y, yang kemudian terdeposit pada permukaan eksternal templat selama proses karbonisasi. Kondisi ini menyebabkan pembentukan struktur karbon yang tidak mampu mereplikasi templat zeolit-Y dan berbentuk tidak teratur (Ting dkk., 2010). Berdasarkan pola difraksi yang terbentuk, pada karbon tertemplat zeolit ini lebih didominasi oleh pembentukan karbon berpori.

Karakterisasi karbon tertemplat zeolit dengan SEM bertujuan untuk membandingkan morfologi karbon tertemplat zeolit dengan zeolit-Y hasil sintesis yang digunakan sebagai templat. Morfologi SEM karbon tertemplat zeolit (Gambar 4.9) menunjukkan pembentukan karbon yang mirip dengan zeolit-Y, yaitu pembentukan kristal oktahedral dengan terlihatnya bentuk kotak menyerupai bentuk kristal zeolit. Akan tetapi dalam jumlah kecil di beberapa bagian lain, masih ditemukan gumpalan karbon tertemplat zeolit amorf. Hal ini menandakan bahwa masih terdapat bagian karbon tertemplat zeolit yang tidak mampu

mereplikasi struktur yang menyerupai partikel zeolit-Y secara sempurna. Adapun pembentukan morfologi kristal oktahedral menandakan proses pengisian karbon pada templat zeolit-Y berjalan sempurna dan karbon dapat mereplikasi struktur kristal yang dimiliki oleh zeolit-Y. Sedangkan pembentukan gumpalan merupakan pembentukan karbon amorf yang menandakan proses pengisian karbon pada pori zeolit-Y tidak berjalan sempurna.



Gambar 4.9 Mikrograf SEM karbon tertemplat zeolit

Sebagaimana penjelasan sebelumnya, pembentukan karbon amorf yang tidak mampu mereplikasi templat secara sempurna diduga berasal dari sebagian derivat sukrosa diluar templat zeolit-Y yang tidak mampu terdifusi kedalam pori-pori templat zeolit-Y, sehingga karbon mengalami kondensasi oleh dirinya sendiri (*self-condensation*). Derivat sukrosa tersebut kemudian terdeposit pada permukaan eksternal templat zeolit-Y selama proses karbonisasi.

Böhme dkk (2005), menjelaskan bahwa ketidaksesuaian rasio sukrosa/templat pada molekul sukrosa dengan konsentrasi tinggi, menyebabkan *viskositas* sukrosa meningkat. Hal ini menyebabkan proses difusi sukrosa ke dalam pori templat akan terhambat selama proses *oligomerisasi* berlangsung, dan pori templat yang tersisa tidak dapat terisi oleh prekursor karbon. Selain itu beberapa prekursor karbon lain akan terdeposit pada bagian eksternal permukaan templat, sehingga selama proses karbonisasi dan penghilangan templat terbentuk karbon *non-porous* (lembaran karbon tak berpori). Adapun faktor lain yang mempengaruhi kemampuan replikasi karbon terhadap templat adalah rasio massa



sukrosa/ $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Larutan asam sulfat yang berperan sebagai katalis dehidrasi untuk menghilangkan air dari molekul sukrosa mengakibatkan rantai silang polimer dapat terbentuk, sehingga reaksi polimerisasi dapat berlangsung. Asam sulfat juga membantu proses inisiasi dalam reaksi polimerisasi. Jika konsentrasi asam sulfat yang diberikan berlebih, maka oligomer besar dapat terbentuk. Oligomer yang terlalu besar ini kemudian tidak dapat masuk ke dalam pori dan terdeposit pada permukaan templat (Joo dkk., 2001). Jika proses inisiasi tidak menggunakan asam, maka proses polimerisasi membutuhkan suhu reaksi yang cukup tinggi. Selain menyebabkan morfologi dari replikasi karbon terhadap templat sulit tercapai, rasio sukrosa/templat dan rasio sukrosa/asam sulfat yang tidak sesuai juga menyebabkan karbon mesopori yang terbentuk mengalami penurunan luas permukaan dan volume pori (Böhme dkk., 2005 dan Joo dkk., 2001). Pemilihan rasio sukrosa/templat dan rasio sukrosa/asam sulfat pada penelitian ini sesuai dengan kondisi optimum yang telah diteliti oleh Kayadoe (2013). Rasio sukrosa/templat sebesar 12,5:10 yang merupakan kondisi terbaik dibandingkan dengan rasio lainnya.

#### **4.2 Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi $\text{K}_2\text{CO}_3$**

Pada penelitian ini dilakukan aktivasi karbon secara kimia menggunakan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  sebagai aktivator sesuai dengan prosedur yang dilakukan oleh Anggarini (2013). Proses aktivasi bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dan membentuk pori berukuran mikro dari karbon mesopori atau karbon grafitik yang terdeposit dipermukaan material. Pori berukuran meso dan grafitik menyebabkan proses adsorpsi hidrogen dilakukan pada tekanan tinggi atau suhu yang relatif rendah (Guan dkk., 2009 dan Yang dkk., 2007), sehingga dengan mengubah pori menjadi mikro maka akan diperoleh material yang memiliki kapasitas besar dalam adsorpsi hidrogen. Menurut Beneyto dkk., 2008 menyebutkan bahwa semakin tinggi volume mikropori, semakin tinggi kapasitas adsorpsi hidrogen. Hal ini menunjukkan bahwa tekstur berpori adalah salah satu faktor utama dalam menentukan karakteristik adsorpsi hidrogen. Oleh karena itu, pada penelitian ini

dilakukan tahapan aktivasi (*post synthesis*) untuk membentuk pori berukuran mikro dengan jumlah yang lebih banyak pada material karbon tertemplat zeolit-Y.

Proses aktivasi pada penelitian ini dilakukan secara kimia dengan menggunakan  $K_2CO_3$  sebagai aktivator. Metode aktivasi karbon tertemplat zeolit-Y dengan  $K_2CO_3$  dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah dilakukan Sevilla dkk.,(2010). Pemilihan rasio  $K_2CO_3$  yang ditambahkan dalam karbon tertemplat zeolit-Y harus sesuai. Hal ini dikarenakan akan berpengaruh pada jumlah mikropori yang terbentuk. Penambahan  $K_2CO_3$  yang sedikit atau terlalu banyak dalam material karbon tertemplat zeolit-Y dapat menghancurkan mikropori yang telah terbentuk. Selain itu jumlah  $K_2CO_3$  yang terlalu kecil dapat menyebabkan terjadinya *blocking* logam kalium yang ada di dalam pori. Hal ini disebabkan jumlah kalium yang ada tidak cukup kuat dalam membentuk pori pada karbon sehingga dapat menurunkan luas permukaan. Jika jumlah  $K_2CO_3$  yang ditambahkan berlebih, maka jumlah karbon yang dioksidasi oleh aktivator untuk membentuk gas CO mengalami peningkatan, sehingga luas permukaan dan volume pori meningkat. Akan tetapi pada rasio tertentu penambahan aktivator berlebih mampu membentuk pori dengan ukuran lebih lebar atau jumlah mesopori meningkat.

Anggarini (2013), telah melakukan penelitian pada material karbon tertemplat zeolit-Y yang diaktivasi dengan variasi rasio penambahan  $K_2CO_3$  (gr)/ karbon (gr) sebesar 0,5; 1; 1,5 dan 2. Pada rasio penambahan  $K_2CO_3$  (gr)/ karbon (gr) sebesar 1,5 dihasilkan pembentukan mikropori dalam jumlah besar dibandingkan dengan rasio lainnya, selain itu karbon amorf yang terbentuk hampir menutupi seluruh bagian karbon oktahedral. Pembentukan mikropori yang meningkat ini menyebabkan kapasitas adsorpsi yang dihasilkan juga meningkat. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan studi adsorpsi menggunakan material karbon tertemplat zeolit-Y yang diaktivasi dengan rasio penambahan  $K_2CO_3$  (gr)/ karbon (gr) sebesar 1,5.

Proses aktivasi yang dilakukan terdiri dari beberapa tahap, antara lain impregnasi karbon tertemplat zeolit-Y dengan larutan  $K_2CO_3$ , dilanjutkan dengan proses aktivasi pada suhu tinggi sebesar  $800^{\circ}C$ , dan pencucian karbon hasil aktivasi. Tahap impregnasi karbon tertemplat zeolit-Y dengan larutan  $K_2CO_3$

dengan rasio 1,5 dilakukan selama 5 jam. Kiliç dkk. (2012) dalam penelitiannya menyatakan bahwa rasio impregnasi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap *yield* karbon yang dihasilkan. Metode impregnasi hanya memungkinkan distribusi  $K_2CO_3$  terjadi merata, sehingga perkembangan pori yang dihasilkan akan menjadi lebih baik. Adapun yang lebih berpengaruh terhadap *yield* karbon adalah pemanasan suhu tinggi pada saat proses aktivasi (Adinata dkk., 2007). Karbon yang telah diimpregnasi kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu  $110^\circ C$  selama 12 jam sebelum dilakukan proses karbonisasi suhu tinggi. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan kandungan air di dalam sampel. Selain itu untuk mencegah kerusakan struktur pori akibat proses keluarnya air yang terlalu cepat pada saat pemanasan suhu tinggi.

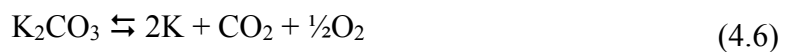
Karbon setelah proses pengeringan kemudian diaktivasi pada suhu  $800^\circ C$  selama 1 jam dalam atmosfer  $N_2$ . Proses aktivasi dengan atmosfer nitrogen bertujuan untuk membantu menghilangkan material volatil yang mungkin masih tersisa pada karbon tertemplat zeolit-Y. Pemanasan suhu tinggi mampu menghilangkan kandungan atom hidrogen dan atom oksigen yang ada di dalam sampel, namun tidak mudah untuk menghilangkan atom karbon (Kiliç dkk., 2012). Adapun aktivasi dengan  $K_2CO_3$  dilakukan pada suhu  $800^\circ C$  agar  $K_2CO_3$  terdekomposisi membentuk atom kalium yang dapat terinterkalasi dalam struktur karbon tertemplat zeolit-Y. Penelitian Hayashi dkk. (2002) mengenai aktivasi karbon dari kulit kacang dengan  $K_2CO_3$  menyatakan bahwa pada suhu di atas  $627^\circ C$  karbon bereaksi dengan  $K_2CO_3$  untuk membentuk CO, sehingga sebagian karbon hilang dan berat menurun. Hayashi dkk. (2002) melalui penelitiannya terkait aktivasi karbon dari kulit buncis dengan  $K_2CO_3$  juga menyebutkan bahwa pada suhu di atas  $727^\circ C$ , karbon dioksidasi oleh  $K_2CO_3$  untuk membentuk CO sehingga beberapa karbon hilang dan terjadi pengurangan berat. Akan tetapi pelepasan molekul CO menyebabkan adanya pembentukan pori pada karbon hasil aktivasi, sehingga luas permukaan spesifik dan volume pori mengalami peningkatan. Adinata dkk. (2007) menjelaskan bahwa karbon bereaksi dengan  $K_2CO_3$  mampu meningkatkan luas permukaan spesifik dengan peningkatan suhu karbonisasi sebesar  $600-800^\circ C$  dan akan sedikit menurun pada rentang  $800-1000^\circ C$ . Selain itu pada penelitian Deng dkk. (2010) menjelaskan bahwa pada

suhu 800°C K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> mampu mencapai titik didihnya, menghasilkan kalium yang terdifusi ke dalam lapis karbon, sehingga menyebabkan pembentukan pori.

Berdasarkan hal tersebut dalam penelitian ini dilakukan aktivasi pada suhu 800°C. Hal ini bertujuan agar K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dapat didekomposisi membentuk logam kalium yang terinterkalasi membentuk pori baru dengan ukuran mikro. Pada saat K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan karbon dipanaskan dalam suhu tinggi dalam atmosfer inert, terjadi reaksi eksotermis dimana K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> membentuk oksida lain sesuai dengan Persamaan 4.5. Reaksi eksotermis dibuktikan melalui proses pendinginan karbon setelah diaktivasi dengan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang membutuhkan waktu hingga 2 hari untuk menghasilkan karbon dengan suhu ruang. Selain itu pendinginan karbon hingga suhu ruang juga digunakan untuk memastikan karbon tidak membara.



Pada suhu tinggi, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> juga mengalami penguraian membentuk atom kalium dan gas karbondioksida yang dapat terinterkalasi pada struktur karbon sesuai dengan Persamaan 4.6. Saat suhu aktivasi dipertahankan pada 800°C selama 1 jam, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dapat bereaksi dengan karbon melalui mekanisme oksidasi-reduksi yang menghasilkan atom kalium dan gas karbonmonoksida seperti ditunjukkan pada Persamaan 4.7 (Mc.Kee, 1983).



Pembentukan K<sub>2</sub>O seperti tertera pada Persamaan 4.5 dan gas CO<sub>2</sub> pada Persamaan 4.6 memungkinkan kedua komponen ini bereaksi dan menghasilkan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kembali seperti ditunjukkan pada Persamaan 4.9 (Otowa dkk., 1993).

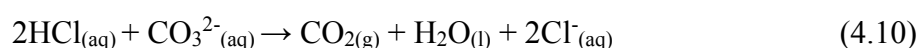


Ketika spesi aktif seperti atom kalium, gas CO dan gas CO<sub>2</sub> terinterkalasi pada bagian karbon grafitik, maka akan menyebabkan pembentukan pori (Deng dkk., 2010). Menurut Sevilla dkk. (2010) menjelaskan bahwa interkalasi tersebut menghasilkan pembentukan pori dengan ukuran pori sebanding dengan jari-jari

spesi yang melewatinya. Interkalasi pada logam kalium mampu untuk membentuk pori berukuran mikro. Hal ini disebabkan logam kalium memiliki jari-jari atom sebesar 0,470 nm (Viswanathan dkk., 2009). Oleh karena itu, logam kalium dapat diaplikasikan dalam adsorpsi hidrogen. Ukuran molekul hidrogen (0,29 nm) akan sangat cocok untuk mengisi pori yang dibentuk oleh logam kalium (Weitkamp., 2009).

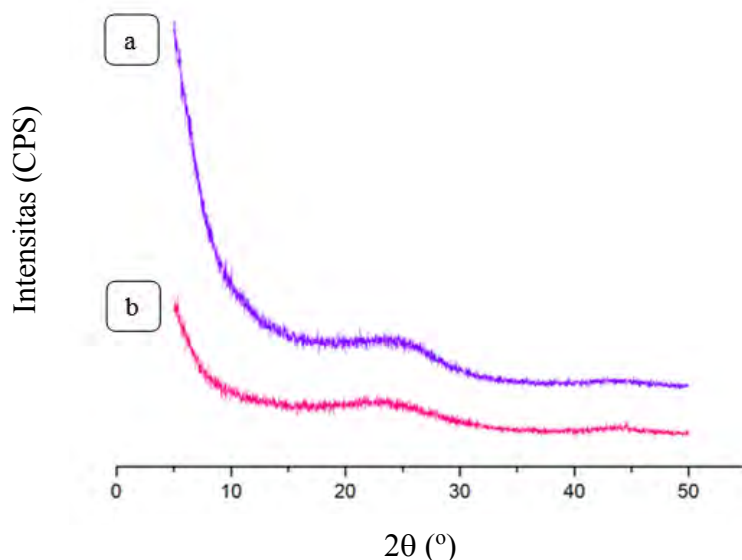
Karbon yang diperoleh setelah proses pemanasan suhu tinggi kemudian dicuci untuk menghilangkan sisa garam anorganik yang mungkin masih terdapat dalam sampel. Terdapat tiga tahapan pencucian pada karbon tertemplat zeolit-Y setelah aktivasi dengan  $K_2CO_3$ , diantaranya pencucian menggunakan HCl, aqua DM panas, dan aqua DM dingin.

Pencucian tahap pertama dilakukan dengan merendam karbon hasil aktivasi  $K_2CO_3$  dengan HCl 2M selama 1 jam. Pencucian menggunakan HCl ini bertujuan untuk menghilangkan sisa ion  $CO_3^{2-}$  yang masih terdapat dalam karbon hasil aktivasi. Persamaan reaksi yang terjadi pada saat proses pencucian sebagai berikut.



Ketika perendaman karbon dengan HCl 2M dihasilkan gelembung gas yang menandakan bahwa terdapat gas  $CO_2$  sebagai hasil reaksi. Gelembung gas  $CO_2$  tersebut mula-mula menempati pori, namun ketika proses pencucian dilakukan gas tergeser keluar dari pori. Proses pencucian menggunakan aqua DM panas dilakukan beberapa kali dan selanjutnya dicuci dengan air destilat dingin hingga filtrat menjadi netral (Hayashi dkk., 2002). Menurut Adinata dkk. (2007), pencucian menggunakan aqua DM panas sangat efektif dalam mereduksi sisa  $K_2CO_3$  yang telah diubah menjadi atom kalium. Proses pencucian dilanjutkan menggunakan aqua DM dingin yang bertujuan untuk menghilangkan sisa ion  $Cl^{-}$  yang berasal dari HCl pada tahap awal pencucian. Karbon yang dihasilkan setelah proses pencucian selanjutnya dikeringkan pada suhu  $110^{\circ}C$  selama 12 jam untuk menghilangkan kandungan air pada material karbon tertemplat zeolit-Y dengan aktivasi  $K_2CO_3$ .

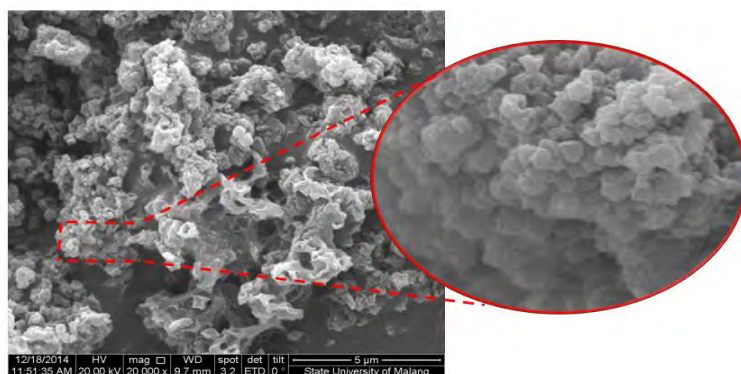
Karbon yang telah teraktivasi kemudian dikarakterisasi dengan XRD untuk mengetahui perubahan pembentukan fasa pada karbon sebelum proses aktivasi dan setelah aktivasi, serta untuk menentukan ketahanan replikasi struktur zeolit pada karbon setelah proses aktivasi. Hasil difraktogram XRD pada karbon tertemplat zeolit sebelum dan setelah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Pola difraktogram (a) Karbon tertemplat zeolit dan (b) Karbon tertemplat zeolit aktivasi  $K_2CO_3$ / Karbon= 1,5

Berdasarkan Gambar 4.10 diketahui bahwa karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi menunjukkan adanya puncak tinggi di daerah  $2\theta = 6^\circ$  bidang [111], yang menunjukkan karbon mereplikasi struktur zeolit-NaY (Su dkk., 2004). Apabila dibandingkan dengan karbon yang telah diaktivasi dengan  $K_2CO_3$ , puncak difraktogram pada daerah  $2\theta = 6^\circ$  memiliki intensitas yang lebih rendah dibandingkan karbon sebelum diaktivasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa setelah proses aktivasi, karbon masih dapat mempertahankan replikasi zeolit-NaY, akan tetapi beberapa struktur keteraturan zeolit-NaY tersebut rusak akibat aktivasi dengan  $K_2CO_3$  sehingga di daerah  $2\theta = 6^\circ$  mengalami penurunan intensitas. Pada difraktogram tidak terdapat puncak yang mengindikasikan adanya atom kalium sisa aktivasi. Apabila garam  $K_2CO_3$  tersebut tidak terdeteksi, hal ini menunjukkan bahwa pencucian yang telah dilakukan efektif untuk menghilangkan atom kalium dari permukaan sampel (Okada dkk., 2003). Selain itu, pada karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi memiliki sejumlah karbon grafitik yang ditandai dengan

adanya puncak pada  $2\theta = \sim 25^\circ$  yang menunjukkan bidang [002] (Guan dkk., 2009). Karbon grafitik tersebut menyebabkan struktur pori karbon tertemplat zeolit sulit berkembang. Akan tetapi setelah dilakukan aktivasi, intensitas puncak karbon grafitik semakin berkurang dan hampir tidak terlihat. Hal ini menandakan bahwa rasio aktivasi  $K_2CO_3$  1,5 secara aktif mampu membentuk pori baru pada lapisan karbon grafitik (Sevilla dkk., 2010).



Gambar 4.11 Mikrograf SEM karbon tertemplat zeolit setelah aktivasi dengan  $K_2CO_3$

Morfologi partikel padatan karbon tertemplat zeolit-Y setelah aktivasi diamati dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Karakterisasi dengan SEM ini bertujuan untuk membandingkan keteraturan dan ketahanan morfologi karbon tertemplat zeolit yang dihasilkan setelah proses aktivasi dengan karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi. Pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa keteraturan replikasi struktur zeolit-NaY masih terlihat jelas dengan adanya struktur oktahedral yang terbentuk. Selain itu terdapat pembentukan karbon amorf yang hampir menutupi seluruh bagian dari karbon berbentuk oktahedral. Terlihat morfologi yang dihasilkan kasar, hal ini menunjukkan bahwa aktivator bekerja dengan kuat untuk membentuk pori pada karbon sehingga dapat menyebabkan peningkatan luas permukaan. Anggarini (2013) dalam penelitiannya juga menjelaskan bahwa pada rasio 1,5 aktivator bekerja kuat untuk membentuk granula dalam jumlah lebih banyak pada permukaan karbon, sehingga luas permukaan meningkat.

### 4.3 Studi Adsorpsi Hidrogen

Studi adsorpsi yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi penentuan kapasitas adsorpsi hidrogen terhadap pengaruh suhu dengan variasi tekanan, penentuan isoterm adsorpsi dan aspek termodinamika.

#### 4.3.1 Penentuan Kapasitas Adsorpsi Hidrogen

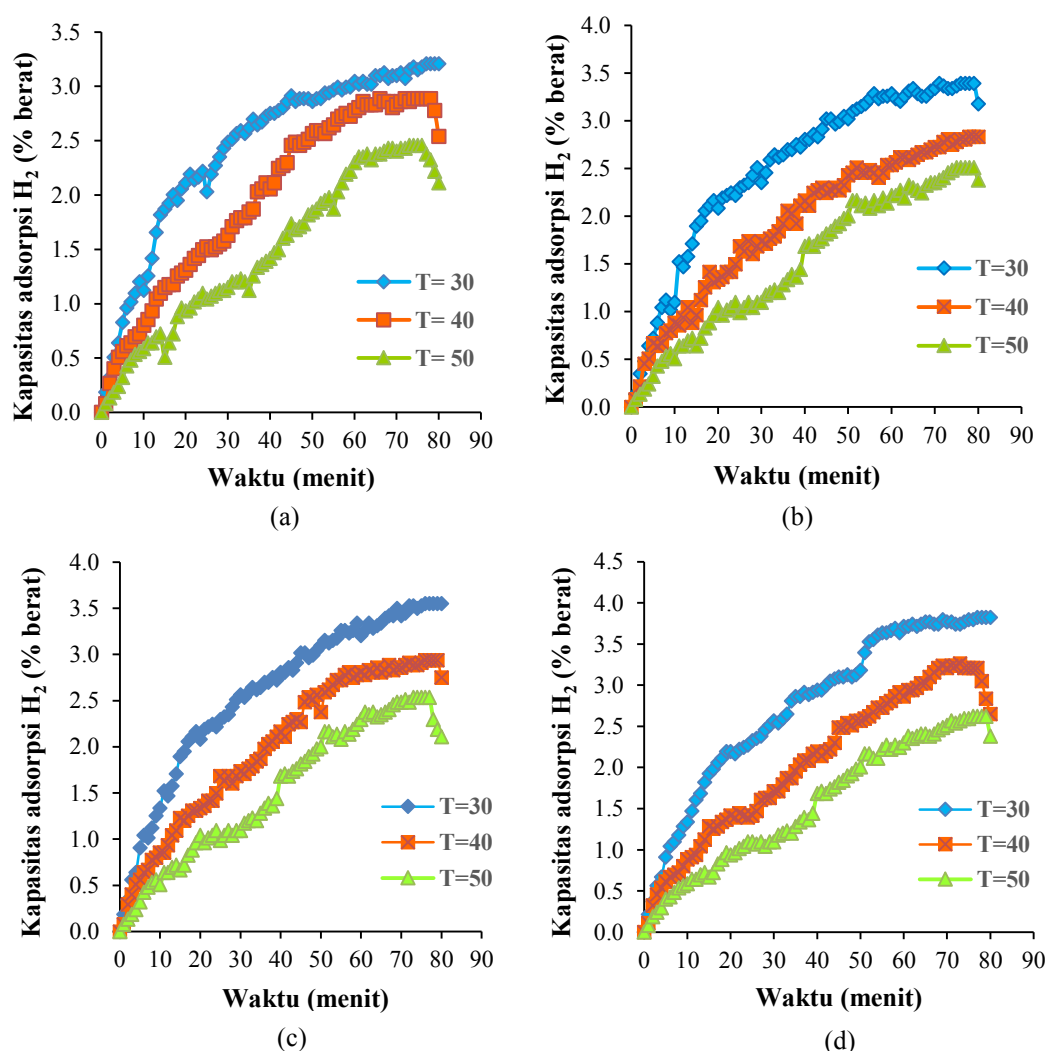
Pada penelitian ini pengujian kapasitas adsorpsi hidrogen dilakukan terhadap karbon tertemplat zeolit-Y yang telah di aktivasi dengan perbandingan rasio  $K_2CO_3$ /Karbon sebesar 1,5. Proses pengukuran kapasitas adsorpsi hidrogen dilakukan dengan metode gravimetri, yaitu dengan cara mengamati perubahan berat sampel ketika dialiri dengan gas hidrogen. Pengamatan perubahan berat dilakukan tiap menit sampai tercapai berat konstan yang menunjukkan sampel telah mencapai batas maksimum dalam menyerap gas hidrogen.

Sebelum proses pengujian kapasitas adsorpsi hidrogen, terlebih dahulu sampel dipreparasi dengan cara dikeringkan dalam oven pada suhu  $105^{\circ}C$  selama 2 jam untuk menghilangkan kandungan air dan gas pengotor yang terperangkap dalam pori-pori material. Proses degassing dilakukan pada suhu  $350^{\circ}C$  selama 3 jam untuk menghilangkan pengotor berupa gas dan uap air yang terjebak di dalam pori karbon tertemplat zeolit-Y agar tidak mengganggu saat proses adsorpsi. Menurut Zukal dkk., (2011) proses degassing dimulai pada suhu ruang hingga mencapai suhu tinggi ( $350^{\circ}C$ ), untuk menghilangkan pengotor dan air yang masih terdapat dalam material. Selain itu, pemilihan rentang suhu tersebut untuk menghindari potensi kerusakan struktural dari sampel karena efek tegangan permukaan dan perubahan hidrotermal. Setelah proses degassing mencapai suhu  $350^{\circ}C$ , kemudian suhu diturunkan hingga mencapai suhu ruang yaitu  $30^{\circ}C$ . Setelah proses preparasi selesai, pengukuran kapasitas adsorpsi hidrogen dapat dilakukan dengan mengalirkan gas hidrogen ke dalam reaktor yang didalamnya telah berisi sampel. Laju alir gas hidrogen diatur konstan 20 mL/menit yang dapat diamati dengan *Mass Flow Control* (MFC).

Pengujian kapasitas adsorpsi hidrogen dilakukan dengan mengamati perubahan berat pada neraca analitik. Pertambahan berat dari cuplikan yang dialiri gas hidrogen dicatat tiap menit hingga diperoleh berat konstan. Kemudian selisih

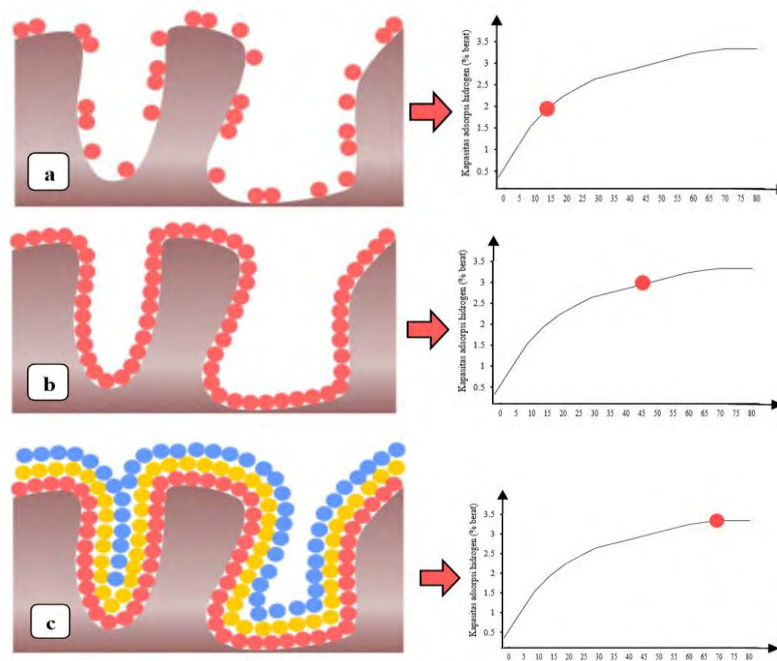


berat tiap menit pada cuplikan yang telah dialiri gas hidrogen dengan sebelum dialiri gas hidrogen dihitung. Selanjutnya selisih dari pertambahan berat tersebut dikonversi menjadi kapasitas adsorpsi hidrogen yang dinyatakan dalam prosentase berat. Penentuan kapasitas adsorpsi hidrogen dilakukan pada variasi suhu sebesar 30, 40, 50°C dan variasi tekanan sebesar 1; 1,5; 2 dan 3 bar. Hasil pengukuran kapasitas adsorpsi hidrogen pada material karbon tertemplat zeolit aktivasi  $K_2CO_3$  ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik pola adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit teraktivasi dengan perbandingan  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 pada tekanan 1 (a) 1 bar; (b) 1,5 bar (c) 2 bar dan (d) 3 bar

Pada Gambar 4.12, menunjukkan pola yang sama untuk hasil variasi suhu dan waktu. Pola ini menunjukkan proses adsorpsi yaitu pertama, terjadi pengisian sisi aktif kosong pada permukaan adsorben oleh adsorbat (Sing, 1982). Tahapan proses adsorpsi awal ini ditunjukkan dengan peningkatan adsorpsi yang tajam pada menit ke-25, seperti ditunjukkan pada ilustrasi Gambar 4.13 (a). Setelah menit ke-25, kapasitas adsorpsi meningkat secara perlahan membentuk lapisan *monolayer* diatas permukaan adsorben hingga menit ke-45, seperti diilustrasikan pada Gambar 4.13 (b). Apabila kondisi ini diteruskan, maka gas hidrogen akan membentuk lapisan *multilayer* hingga mencapai konstan pada menit ke-70 hingga menit ke-80 yang disebabkan oleh semakin berkurangnya sisi aktif yang kosong akibat sudah terisi oleh adsorbat, seperti diilustrasikan pada Gambar 4.13 (c). Pada saat kapasitas adsorpsi mencapai konstan, sisi aktif permukaan adsorben telah terisi oleh adsorbat dan mencapai keadaan jenuh (Sing, 1982). Saat jenuh inilah menyebabkan hidrogen untuk lepas dari adsorben, sehingga terjadi penurunan kapasitas adsorpsi hidrogen pada permukaan adsorben. Menurut Sing (1982), keadaan tersebut telah mencapai kesetimbangan yang menunjukkan telah tercapainya batas maksimum penyerapan adsorbat oleh adsorben.



Gambar 4.13 Mekanisme masuknya gas hidrogen pada permukaan karbon tertemplat zeolit-Y yang telah di aktivasi dengan perbandingan rasio  $K_2CO_3$ /Karbon sebesar 1,5

Tercapainya kapasitas adsorpsi yang konstan ini terjadi pada waktu 70 hingga kurang dari 80 menit untuk semua variasi suhu dan tekanan. Pada tekanan 1 bar (Gambar 4.12 (a)) pada suhu 30, 40 dan 50°C, kapasitas adsorpsi hidrogen mencapai 3,206; 2,885 dan 2,458% berat. Pada tekanan 1,5 bar, kapasitas adsorpsi hidrogen mencapai 3,393; 2,832 dan 2,511% berat pada suhu 30, 40 dan 50°C (Gambar 4.12 (b)). Sedangkan pada tekanan 2 bar, kapasitas adsorpsi hidrogen mencapai 3,553; 2,939 dan 2,538% berat dan pada tekanan 3 bar kapasitas hidrogen mencapai 3,821; 3,207 dan 2,619% berat pada suhu 30, 40 dan 50°C berturut-turut (Gambar 4.12 (c) dan (d)). Hasil variasi suhu dan tekanan saat adsorpsi hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit-Y teraktivasi  $K_2CO_3$  ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil variasi suhu dan tekanan saat adsorpsi hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit-Y teraktivasi  $K_2CO_3$  pada rasio  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5

Kapasitas adsorpsi hidrogen (% berat)				
Variasi Suhu (°C)	Variasi Tekanan (bar)			
	1	1,5	2	3
30	3,206	3,393	3,553	3,821
40	2,885	2,832	2,939	3,207
50	2,458	2,511	2,538	2,619

Hasil pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa suhu berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi hidrogen pada material berpori, semakin rendah kapasitas adsorpsi hidrogen  $K_2CO_3$ . Kenaikan suhu menunjukkan terjadinya penurunan kapasitas adsorpsi hidrogen pada semua hasil variasi tekanan. Kenaikan suhu sebesar 10°C menunjukkan terjadinya penurunan kapasitas adsorpsi rata-rata sebesar 0,5% berat berdasarkan hasil pada variasi tekanan.

Penelitian yang telah dilakukan Anggarini (2013) menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi hidrogen pada karbon tertemplat zeolit pada suhu 30°C dan tekanan 1 bar sebesar 2,87% berat. Xia dkk., (2013) menggunakan material Karbon/MCM-41 mampu mengadsorpsi hidrogen sebesar <0,1% berat pada suhu 25°C dan tekanan 1 bar. Assfour dkk., (2011) dengan material ZIF-8 juga mampu

mengadsorp hidrogen sebesar <0,1% berat pada suhu 27°C dan tekanan 1 bar. Selain itu Gerasimos dan Xenophon (2010), mengadsorp hidrogen menggunakan material *single wall carbon nanotube*-85% (SWCNT-85%) dan *multi wall carbon nanotube* (MWCNT-95%) dengan kapasitas adsorpsi hidrogen masing-masing sebesar 0,36 dan 0,22% berat. Prasanth dkk., (2008) menggunakan material zeolit-NaX dengan selisih suhu sebesar 30°C, didapatkan hasil peningkatan suhu menunjukkan terjadinya penurunan kapasitas adsorpsi sebesar 0,2% berat.

Pada penelitian ini, hasil yang diperoleh sesuai dengan pernyataan Strobel, dkk (2006) bahwa semakin tinggi suhu saat adsorpsi hidrogen pada material berpori, semakin rendah kapasitas adsorpsinya. Sebagaimana dinyatakan pada penelitian Zamora dkk., (2013), bahwa adsorpsi hidrogen pada permukaan material karbon merupakan jenis fisorpsi atau adsorpsi fisik, yaitu adsorpsi yang terjadi akibat interaksi gaya *van der Waals* antara adsorben dan adsorbat. Menurut Panella dkk., (2005), interaksi gaya *van der Waals* ini menjadi melemah dengan meningkatnya suhu. Pada suhu yang lebih tinggi, molekul hidrogen akan bergerak lebih cepat, sehingga gaya *van der Waals* antara hidrogen dan karbon akan menurun. Oleh karena itu, pada suhu yang lebih tinggi, kapasitas adsorpsi hidrogen lebih rendah.

Hasil pada Tabel 4.1 juga menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan yang digunakan untuk mengadsorpsi gas hidrogen maka semakin besar pula kapasitas adsorpsi yang dihasilkan. Pada tekanan tinggi dan suhu rendah (3 bar/30°C) memiliki nilai kapasitas adsorpsi yang besar yakni 3,821% berat. Hasil yang diperoleh sesuai dengan penelitian Zamora dkk., (2013) yang mengadsorp hidrogen menggunakan komposit  $\text{Cd}_3\text{Fe}^{\text{III}}/\text{TiNT}$  pada tekanan 0-5 bar. Penelitian tersebut menunjukkan adanya peningkatan kapasitas adsorpsi hidrogen pada tekanan yang semakin tinggi, dimana pada tekanan 5 bar kapasitas adsorpsi hidrogen mencapai 8 mg/g. Proses adsorpsi maksimum efektif terjadi pada tekanan yang lebih tinggi dikarenakan tekanan tinggi memberikan kekuatan gaya dorong untuk perpindahan massa antara adsorbat ke material adsorben (Bahrami dkk., 2012).

#### 4.3.2 Perbandingan Sifat Permukaan Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi $K_2CO_3$ sebelum dan setelah adsorpsi

Pada penelitian ini, sifat permukaan karbon tertemplat zeolit-Y teraktivasi  $K_2CO_3$  sebelum dan setelah adsorpsi ditentukan dengan adsorpsi-desorpsi nitrogen untuk mengetahui perubahan sifat permukaan akibat adsorpsi hidrogen. Sifat permukaan yang berpengaruh terhadap proses adsorpsi adalah luas permukaan dan struktur pori. Apabila luas permukaan adsorben besar dan ukuran pori adsorben sesuai untuk mengadsorpsi adsorbat, maka interaksi antara adsorbat dan adsorben akan mudah terjadi. Hal ini mengakibatkan adanya peningkatan kapasitas adsorpsi. Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan sifat fisik permukaan karbon tertemplat zeolit aktivasi  $K_2CO_3$ /Karbon=1,5 sebelum dan setelah mengadsorpsi  $H_2$ .

Tabel 4.2 Sifat fisik permukaan karbon tertemplat zeolit aktivasi  $K_2CO_3$ /Karbon=1,5 sebelum dan setelah mengadsorpsi  $H_2$

Sampel	Luas Permukaan BET ( $m^2/gr$ )	Volume Pori Total ( $cc/gr$ )	Volume Mikropori (SF) ( $cc/gr$ )	Diameter Pori Rata-rata (BET) (nm)	Pustaka
$K_2CO_3$ /Karbon tertemplat zeolit-NaY= 1,5 sebelum mengadsorpsi $H_2$	1.441,335	1,145	0,697	3,177	Anggarini (2013)
$K_2CO_3$ /Karbon tertemplat zeolit-NaY= 1,5 setelah mengadsorpsi $H_2$	387,596	0,222	0,187	2,295	Hasil penelitian

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa luas permukaan karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$  setelah mengadsorpsi hidrogen mengalami penurunan sebesar  $1.053,739 m^2/gr$ , dari  $1.441,335 m^2/gr$  menjadi  $387,596 m^2/gr$ . Penurunan luas permukaan pada karbon tertemplat zeolit setelah mengadsorpsi hidrogen menunjukkan bahwa hidrogen telah mengisi permukaan pori kosong karbon tertemplat zeolit. Pada suhu  $30^\circ C$  dan tekanan 1 bar, permukaan pori karbon tertemplat zeolit mampu mengadsorpsi hidrogen sebesar  $0,0152 mmol/m^2$ . Hal ini

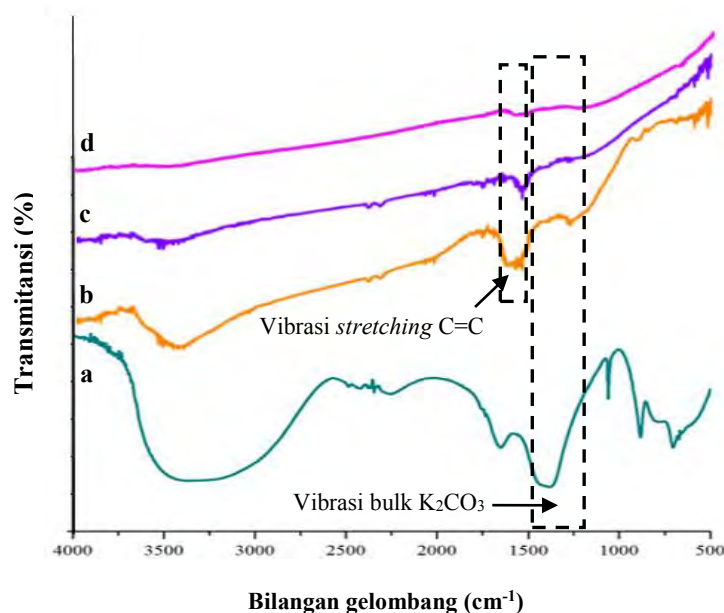
menunjukkan bahwa permukaan pori kosong karbon tertemplat zeolit telah terisi adsorbat sebanyak 0,0152 mmol hidrogen dalam tiap luasan adsorben.

Volume pori total pada karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$  setelah mengadsorpsi hidrogen mengalami penurunan sebesar 0,923 cc/gr, dari 1,145 cc/gr menjadi 0,222 cc/gr. Adapun penurunan volume mikropori juga terjadi pada karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$  yakni sebesar 0,510 cc/gr, dari 0,697 cc/gr menjadi 0,187 cc/gr. Hasil tersebut menunjukkan bahwa gas hidrogen telah mengisi pori mikro yang ditunjukkan dengan adanya penurunan volume mikropori. Pori mikro pada karbon tertemplat zeolit terisi adsorbat sebanyak 31,431 mmol/cc.

Pori berukuran mikro sangat sesuai untuk mengadsorp gas hidrogen. Menurut Weitkamp dkk., (2009), ukuran molekul gas hidrogen sebesar 0,29 nm, sehingga pori yang sangat cocok untuk mengadsorp hidrogen sebesar 0,7-0,9 nm. Pori zeolit-Y memiliki ukuran mikropori yaitu sebesar 0,7 nm sampai 1,3 nm, sehingga pori tersebut sangat sesuai untuk mengadsorp hidrogen. Adapun ukuran pori optimal adsorben untuk adsorpsi hidrogen antara 0,65-0,9 nm (Bhatia, 2006; Gigras dkk., 2007; dan Ströbel, 2006). Berdasarkan bahasan diatas, dapat disimpulkan bahwa zeolit dengan ukuran mikro mampu mengadsorp hidrogen dengan baik.

#### **4.3.3 Perbandingan Hasil Spektra FTIR pada Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi $K_2CO_3$ sebelum dan setelah adsorpsi**

Karakterisasi dengan spektroskopi inframerah dilakukan pada  $K_2CO_3$  murni, karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi, karbon yang telah diaktivasi dengan rasio  $K_2CO_3$ /karbon 1,5 sebelum dan setelah proses adsorpsi hidrogen. Karakterisasi dengan FTIR dilakukan untuk mengkarakterisasi gugus fungsi di permukaan material dan untuk mengetahui hilangnya garam sisa  $K_2CO_3$  dalam sampel karbon setelah proses pencucian. Spektrum IR sampel karbon ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Spektrum IR a)  $K_2CO_3$ ; b) Karbon tertemplat zeolit; c)  $K_2CO_3$ /Karbon = 1,5 sebelum mengadsorp hidrogen; d)  $K_2CO_3$ /Karbon = 1,5 setelah mengadsorp hidrogen

Berdasarkan Gambar 4.14(a) terlihat dua karakteristik puncak serapan  $K_2CO_3$  murni di bilangan gelombang  $1384,91\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi *bulk*  $K_2CO_3$  (Lukic dkk., 2009) dan puncak serapan di daerah  $3368,91\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi *stretching* gugus O-H (Deng dkk., 2010). Adanya puncak vibrasi *stretching* gugus O-H berasal dari air yang terkandung dalam  $K_2CO_3$  murni.  $K_2CO_3$  bersifat higroskopis sehingga sangat mudah menyerap uap air ketika kontak dengan udara. Hal ini ditandai munculnya puncak lebar dalam spektrum IR  $K_2CO_3$  yang mengindikasikan adanya kandungan uap air.

Gambar 4.14(b) adalah spektra IR sampel karbon tertemplat zeolit sebelum aktivasi menunjukkan puncak serapan pada daerah  $3436\text{ cm}^{-1}$  dan  $1640\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan vibrasi *stretching* O-H dan C=C dari karbon tertemplat zeolit. Gambar 4.14(c) dan (d) memperlihatkan tidak terdapatnya puncak pada daerah  $1384,91\text{ cm}^{-1}$  dari vibrasi *bulk*  $K_2CO_3$ . Hal ini mengindikasikan bahwa sampel karbon tertemplat zeolit yang telah diaktivasi dengan  $K_2CO_3$  telah bersih dari sisa garam  $K_2CO_3$ . Pada Gambar 4.14(c) dan (d) juga terdapat serapan pada daerah  $1631\text{--}1664\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi *stretching* gugus C=C yang berasal dari karbon tertemplat zeolit (Sakintuna, 2006). Namun terjadi penurunan

intensitas serapan setelah proses adsorpsi hidrogen (Gambar 4.14d) yang mengindikasikan bahwa masih terdapat sedikit gas hidrogen pada permukaan karbon tertemplat zeolit.

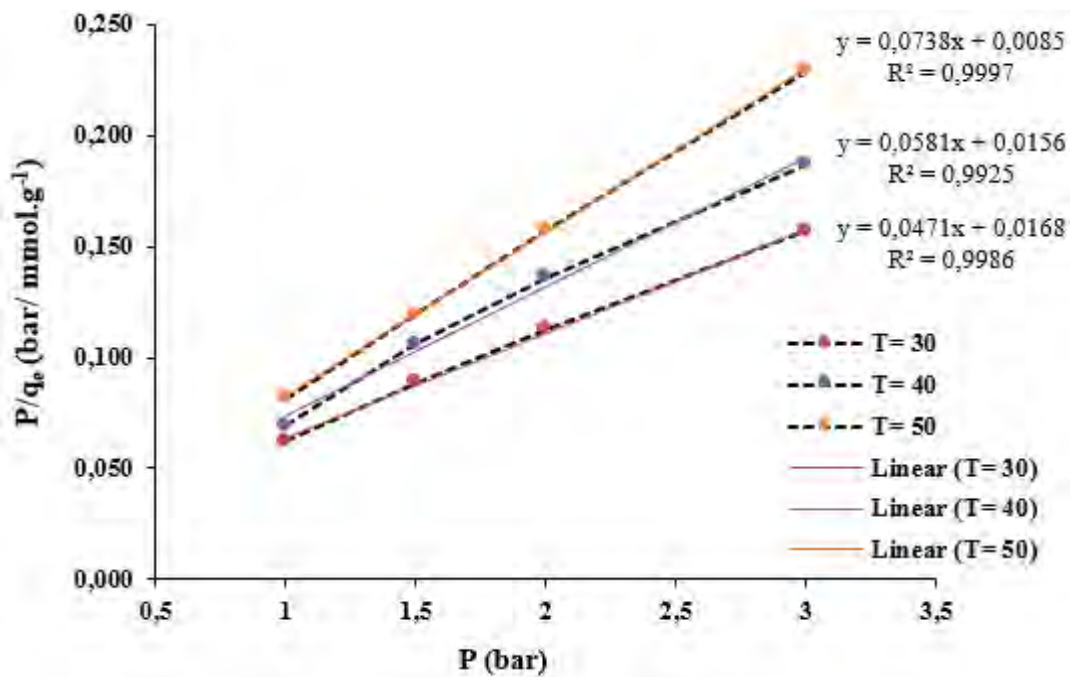
#### 4.3.4 Isoterm adsorpsi

Penentuan isoterm adsorpsi karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$  rasio 1,5 menggunakan 4 model isoterm antara lain isoterm Langmuir, Freundlich, Tempkin dan kombinasi Langmuir-Freundlich (Sips). Jika adsorbat yang digunakan berupa larutan maka banyaknya molekul yang teradsorp merupakan fungsi konsentrasi dan suhu. Akan tetapi jika adsorbat yang digunakan berupa gas, maka banyaknya molekul yang teradsorp merupakan fungsi dari tekanan (Alberty, 1990).

##### 4.3.4.1 Isoterm Adsorpsi Langmuir

Hasil pengolahan data eksperimen terhadap model isoterm Langmuir dengan Persamaan 2.5 ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan Tabel 4.3. Pada persamaan isoterm Langmuir, nilai konstanta Langmuir ( $K_L$ ) dan kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_{max}$ ) dapat ditentukan secara eksperimen dari *slope* dan *intercept* dengan membuat plot data  $P/q_e$  ( $bar/mmole.g^{-1}$ ) terhadap  $P$ (bar). Pada Gambar 4.15 memperlihatkan plot garis isoterm model Langmuir dengan adsorben berupa karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$ /Karbon rasio 1,5 dan adsorbat berupa gas hidrogen.





Gambar 4.15 Kurva isoterm adsorpsi Langmuir untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5

Nilai parameter adsorpsi isoterm Langmuir seperti konstanta Langmuir ( $K_L$ ) dan kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_{max}$ ) pada variasi suhu ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Parameter isoterm adsorpsi Langmuir untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$

T = 30 °C	$K_L$ (bar <sup>-1</sup> )	$q_{max}$ (mmol.g <sup>-1</sup> )	$R^2$
	2,804	21,231	0,9986
T = 40 °C	$K_L$ (bar <sup>-1</sup> )	$q_{max}$ (mmol.g <sup>-1</sup> )	$R^2$
	3,724	17,212	0,9925
T = 50 °C	$K_L$ (bar <sup>-1</sup> )	$q_{max}$ (mmol.g <sup>-1</sup> )	$R^2$
	8,680	13,550	0,9997

Nilai kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_{max}$ ) pada karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$  sebesar 21,231; 17,212 dan 13,550 mmol.g<sup>-1</sup> berturut-turut pada variasi suhu 30, 40 dan 50°C. Penurunan nilai  $q_{max}$  pada adsorben berbanding

lurus terhadap naiknya suhu. Nilai  $q_{\max}$  yang diperoleh pada suhu 30°C memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan suhu lainnya yaitu sebesar 21,231 mmol.g<sup>-1</sup>. Hal ini menegaskan bahwa afinitas antara gas hidrogen dan karbon teremplat zeolit teraktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> memiliki hubungan terbalik dengan temperatur dan menunjukkan sifat eksoterm (Khalili dkk., 2013).

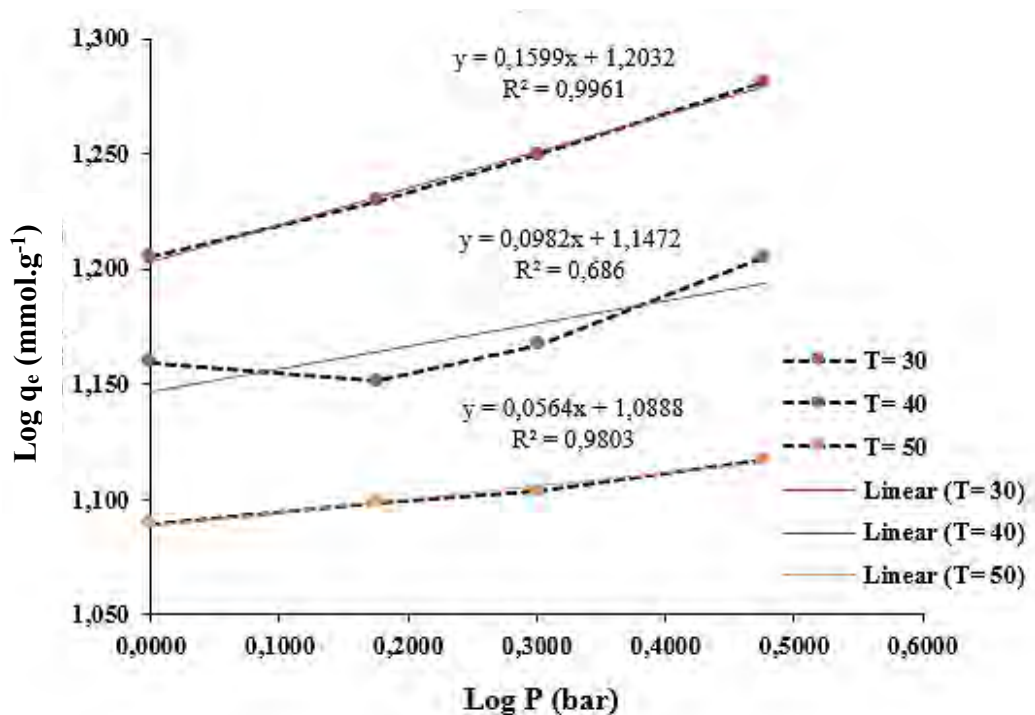
Nilai konstanta Langmuir ( $K_L$ ) pada karbon teremplat zeolit teraktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sebesar 2,804; 3,724 dan 8,680 bar<sup>-1</sup> berturut-turut pada variasi suhu 30, 40 dan 50°C. Nilai  $K_L$  merupakan nilai konstanta yang berkaitan dengan energi bebas adsorpsi, dimana apabila suhu semakin meningkat menyebabkan nilai  $K_L$  menjadi lebih positif yang menandakan bahwa adsorpsi tidak dapat terjadi secara baik (Belhachemi dan Addoun, 2011). Pada penelitian ini menunjukkan bahwa nilai  $K_L$  semakin meningkat dengan naiknya suhu yang mengindikasikan bahwa pada suhu yang lebih tinggi adsorpsi yang terjadi cenderung kurang maksimal. Hal ini berbanding lurus dengan nilai kapasitas adsorpsi yang semakin menurun dengan naiknya suhu yakni 3,206; 2,885 dan 2,458% berat pada tekanan 1 bar.

Hasil yang serupa juga ditunjukkan pada penelitian Khalili (2013) dengan menggunakan *multi wall carbon nanotube* (MWCNT) untuk adsorpsi gas CO<sub>2</sub>. Adsorpsi gas CO<sub>2</sub> dengan material berpori juga menunjukkan adanya penurunan nilai  $q_{\max}$  dengan meningkatnya suhu adsorpsi. Nilai  $q_{\max}$  berturut-turut pada suhu 25, 35 dan 45°C yaitu 30,81; 28,79 dan 27,55 mmol.g<sup>-1</sup> dengan rata-rata selisih kapasitas adsorpsi sebesar 2 mmol.g<sup>-1</sup>. Penurunan nilai  $q_{\max}$  juga sesuai dalam penelitian Bahrami dkk., (2012) dengan material karbon aktif untuk adsorpsi gas HF. Bahrami dkk., (2012) menunjukkan nilai  $q_{\max}$  mengalami penurunan rata-rata sebesar 27 mg.g<sup>-1</sup> atau 2,7 mmol.g<sup>-1</sup> seiring dengan naiknya suhu sebesar 28, 40 dan 55°C. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengalami penurunan kapasitas adsorpsi dengan naiknya suhu.

#### 4.3.4.2 Isoterm Adsorpsi Freundlich

Hasil pengolahan data eksperimen terhadap model isoterm Freundlich dengan Persamaan 2.7 ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Tabel 4.4. Pada persamaan isoterm Freundlich, nilai konstanta Freundlich ( $K_F$ ) dan parameter intensitas Freundlich (1/n) dapat ditentukan secara eksperimen dari *slope* dan

*intercept* dengan membuat plot data  $\text{Log } q_e \text{ (mmol.g}^{-1}\text{)}$  terhadap  $\text{Log } P \text{ (bar)}$ . Pada Gambar 4.16 memperlihatkan plot garis isoterm model Freundlich dengan adsorben berupa karbon tertemplat zeolit yang telah diaktivasi dengan rasio perbandingan  $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{karbon}$  sebesar 1,5 dan adsorbat berupa gas hidrogen.



Gambar 4.16 Kurva isoterm adsorpsi Freundlich untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan  $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Karbon}$  1,5

Nilai konstanta Freundlich ( $K_F$ ) dan parameter intensitas Freundlich ( $1/n$ ) pada suhu  $30^\circ\text{C}$  sebesar  $15,966 \text{ (mmol.g}^{-1}\text{)}/(\text{bar})^{1/n}$  dan 0,160. Model isoterm Freundlich mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada adsorben dengan permukaan heterogen, terjadi perbedaan distribusi dari panas adsorpsi diatas permukaan (tiap molekul mempunyai potensi penyerapan yang berbeda) dan tempat untuk berikatan antara adsorben dan adsorbat bebas atau tidak ekivalen (Hamad dkk., 2011). Nilai parameter adsorpsi isoterm Freundlich secara keseluruhan pada variasi suhu ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Parameter isoterm adsorpsi Freundlich untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon teremplat zeolit teraktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

T = 30 °C	K <sub>F</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )/(bar) <sup>1/n</sup>	1/n	R <sup>2</sup>
	15,966	0,160	0,9962
T = 40 °C	K <sub>F</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )/(bar) <sup>1/n</sup>	1/n	R <sup>2</sup>
	14,035	0,098	0,6860
T = 50 °C	K <sub>F</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )/(bar) <sup>1/n</sup>	1/n	R <sup>2</sup>
	12,269	0,056	0,9803

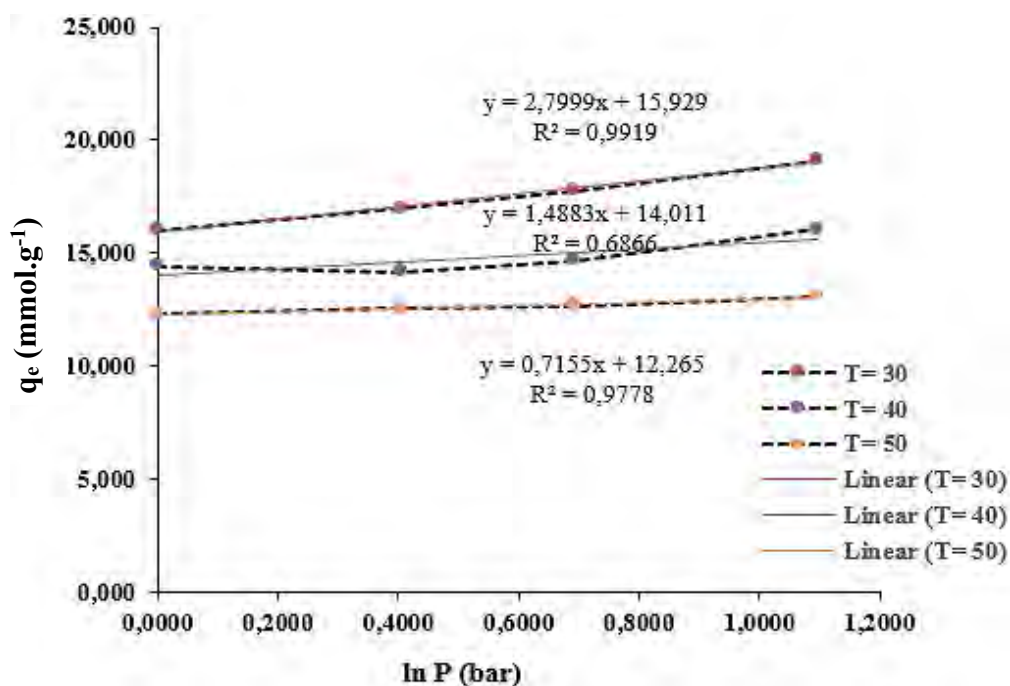
Tabel 4.4 menunjukkan nilai *slope* (1/n) yang dihasilkan berada pada rentang antara 0 hingga 1. Nilai 1/n adalah ukuran intensitas adsorpsi atau keheterogenan permukaan dan menjadi lebih heterogen jika nilainya semakin dekat ke nol (Foo, 2010 dan Delavar dkk., 2012). Pada penelitian ini, nilai *slope* berturut-turut pada suhu 30, 40 dan 50°C antara lain 0,160; 0,098 dan 0,056. Berdasarkan nilai *slope* yang diperoleh, maka proses adsorpsi hidrogen pada karbon teremplat zeolit yang diaktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> memiliki permukaan yang semakin heterogen dengan meningkatnya suhu. Permukaan yang semakin tidak seragam atau heterogen menyebabkan kapasitas adsorpsi yang dihasilkan menurun. Terbukti dalam penelitian ini suhu 50°C memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih rendah dari suhu 30°C dan 40°C. Penurunan nilai 1/n juga diperoleh pada penelitian Khalili dkk., (2013) menggunakan karbon aktif untuk mengadsorpsi CO<sub>2</sub>. Harga 1/n berturut-turut menurun pada suhu 25°C dan 35°C seiring dengan meningkatnya suhu antara lain 0,460 dan 0,454.

Nilai konstanta Freundlich (K<sub>F</sub>) merupakan konstanta yang terkait dengan kapasitas adsorpsi (Khedr dkk., 2014 dan Hamad dkk., 2011). Pada penelitian ini, nilai K<sub>F</sub> menurun seiring dengan naiknya suhu antara lain 15,966; 14,035 dan 12,269 (mmol.g<sup>-1</sup>)/(bar)<sup>1/n</sup>. Hal ini juga terjadi pada penelitian Delavar dkk., (2012) yang mengadsorpsi gas alam dengan material MWCNT, hasil menunjukkan bahwa K<sub>F</sub> mengalami penurunan rata-rata sebesar 0,21. Khalili dkk., (2013) dan Bharami dkk., (2012) juga menunjukkan hasil serupa dengan terjadinya penurunan nilai K<sub>F</sub> seiring dengan meningkatnya suhu. Hal tersebut menunjukkan

bahwa afinitas antara adsorbat dan adsorben menurun dengan naiknya suhu (Delavar dkk, 2012).

#### 4.3.4.3 Isoterm Adsorpsi Tempkin

Hasil pengolahan data eksperimen terhadap model isoterm Tempkin dengan Persamaan 2.9 ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Tabel 4.5. Pada persamaan isoterm Tempkin, konstanta isoterm Tempkin ( $K_T$ ) dan konstanta bagian adsorpsi (B) dapat ditentukan secara eksperimen dari *slope* dan *intercept* plot dari  $q_e$  (mmol.g<sup>-1</sup>) terhadap  $\ln P$  (bar). Model Tempkin mengasumsikan tentang interaksi antara adsorben dengan adsorbatnya yang terjadi secara kimia. Model ini menganggap bahwa panas adsorpsi pada semua molekul di permukaan akan menurun linier dengan jumlah interaksi antara adsorbat dengan adsorben hingga mencapai energi ikat maksimum. Persamaan Tempkin sesuai untuk memprediksi kesetimbangan fase gas (Foo, 2010). Pada Gambar 4.17 memperlihatkan plot garis isoterm model Tempkin dengan adsorben berupa karbon tertemplat zeolit teaktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Karbon dengan rasio 1,5 dan adsorbat berupa gas hidrogen.



Gambar 4.17 Kurva isoterm adsorpsi Tempkin untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Karbon 1,5

Nilai-nilai parameter adsorpsi isotherm Tempkin pada variasi suhu seperti konstanta isotherm Tempkin ( $K_T$ ) dan konstanta bagian adsorpsi (B) ditunjukkan pada Tabel 4.5.

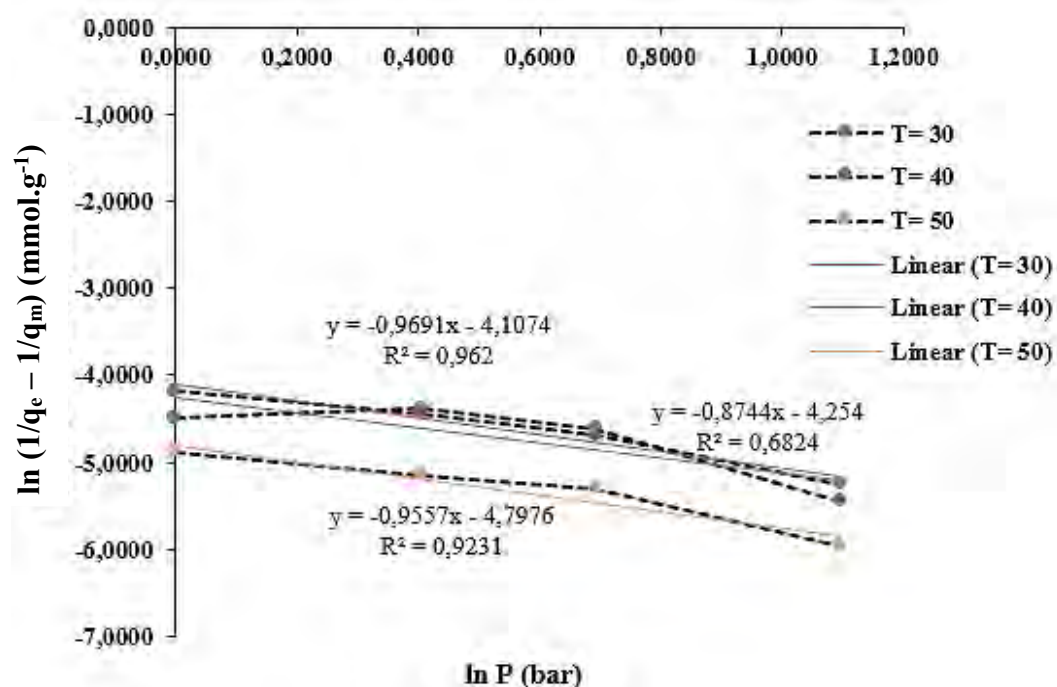
Tabel 4.5 Parameter isotherm adsorpsi Tempkin untuk gas hidrogen oleh adsorben karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$

T = 30 °C	$K_T$ (bar <sup>-1</sup> )	B	b (J.mol <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
	2,956 x 10 <sup>2</sup>	2,800	899,693	0,9920
T = 40 °C	$K_T$ (bar <sup>-1</sup> )	B	b (J.mol <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
	1,226 x 10 <sup>4</sup>	1,488	1748,845	0,6866
T = 50 °C	$K_T$ (bar <sup>-1</sup> )	B	b (J.mol <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
	2,784 x 10 <sup>7</sup>	0,716	3755,835	0,9778

Berdasarkan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai  $K_T$  menurun berturut-turut pada suhu 30, 40 dan 50°C yaitu sebesar 2,956x10<sup>2</sup> ; 1,226x10<sup>4</sup> dan 2,784x10<sup>7</sup> bar<sup>-1</sup>. Penurunan nilai  $K_T$  mengindikasikan bahwa energi ikatan maksimum antara adsorbat dan adsorben menurun seiring dengan meningkatnya suhu. Hal ini dikarenakan interaksi yang terjadi antara adsorbat dengan adsorben akan sulit untuk terjadi pada suhu tinggi (Achmad dkk., 2012). Nilai B merupakan bagian dari adsorpsi, dimana nilai B merupakan hasil perhitungan dari  $\frac{RT}{b}$ , nilai b ini akan berkaitan dengan panas adsorpsi. Konstanta b yang terkait dengan panas adsorpsi untuk hidrogen pada karbon tertemplat zeolit teraktivasi  $K_2CO_3$  menunjukkan nilai yang semakin tinggi berturut-turut pada suhu 30°C, 40°C dan 50°C yaitu 899,693; 1748,845 dan 3755,835 J.mol<sup>-1</sup>. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa panas adsorpsi memiliki rentang pada panas adsorpsi fisika, dengan nilai kurang dari 8400 J.mol<sup>-1</sup> (Parker, 1993). Panas adsorpsi semakin meningkat dengan naiknya suhu, hal ini mengakibatkan kapasitas adsorpsi yang diperoleh semakin menurun (Achmad dkk., 2012). Pernyataan tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, bahwa nilai kapasitas adsorpsi yang semakin menurun dengan naiknya suhu yakni 3,21; 2,88 dan 2,46% berat pada tekanan 1 bar.

#### 4.3.4.4 Isoterm Adsorpsi Sips

Isoterm adsorpsi Sips merupakan bentuk gabungan dari Langmuir dan Freundlich. Model ini sering diaplikasikan pada pemodelan desain adsorben dikarenakan isoterm adsorpsi Sips dapat mengatasi keterbatasan dalam isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich (Delavar, 2012). Isoterm adsorpsi Sips merupakan persamaan Langmuir yang telah dimodifikasi dengan memperhatikan faktor keheterogenan adsorben berdasar pada persamaan Freundlich (Suwani dkk., 2011 dan Tedds, 2011). Isoterm adsorpsi Sips ditentukan dengan Persamaan 2.11. Konstanta Sips ( $K_s$ ), kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_{\max}$ ), dan parameter intensitas Freundlich ( $1/n$ ) dapat ditentukan secara eksperimen dari *slope* dan *intercept* dengan membuat plot data  $\ln(1/q_e - 1/q_m)$  ( $\text{mmol.g}^{-1}$ ) terhadap  $\ln P$  (bar). Pada Gambar 4.18 memperlihatkan plot garis isoterm model Sips dengan adsorben berupa karbon tertemplat zeolit yang telah diaktivasi dengan rasio perbandingan  $\text{K}_2\text{CO}_3$ /Karbon sebesar 1,5 dan adsorbat berupa gas hidrogen.



Gambar 4.18 Kurva isoterm adsorpsi Sips untuk adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan  $\text{K}_2\text{CO}_3$ /Karbon 1,5

Nilai kapasitas adsorpsi lapisan monolayer  $q_{\max}$  pada adsorben karbon tertemplat zeolit sebesar 21,231 mmol.g<sup>-1</sup>, nilai  $1/n = 0,97$ ,  $K_s = 2,961 \text{ bar}^{-1}$  serta memiliki koefisien korelatif dengan nilai  $R^2 = 0,9624$ . Nilai tersebut merupakan nilai yang diambil ketika suhu sebesar 30°C. Nilai-nilai parameter adsorpsi isotherm Sips secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Parameter isotherm adsorpsi Sips untuk gas hidrogen oleh adsorbat karbon tertemplat zeolit

T = 30 °C	$K_s (\text{bar}^{-1})$	$q_{\max} (\text{mmol.g}^{-1})$	$1/n$	$R^2$
	2,961	21,231	0,9691	0,9624
T = 40 °C	$K_s (\text{bar}^{-1})$	$q_{\max} (\text{mmol.g}^{-1})$	$1/n$	$R^2$
	5,006	17,212	0,8744	0,6824
T = 50 °C	$K_s (\text{bar}^{-1})$	$q_{\max} (\text{mmol.g}^{-1})$	$1/n$	$R^2$
	9,905	13,550	0,9557	0,9231

Pada Tabel 4.6 terlihat bahwa kapasitas adsorpsi maksimum di lapisan monolayer pada suhu 30, 40 dan 50°C sebesar 21,231; 17,212 dan 13,550 mmol.g<sup>-1</sup>. Dari parameter adsorpsi, nilai  $q_{\max}$  yang diperoleh semakin turun seiring dengan meningkatnya suhu. Hasil ini menunjukkan bahwa adsorpsi bersifat eksotermis, sehingga adsorpsi pada penelitian ini paling baik dilakukan pada suhu 30°C (Suwandi dkk., 2011). Parameter intensitas Freundlich ( $1/n$ ) menunjukkan nilai yang mendekati 1, ini mengindikasikan bahwa adsorpsi dapat terjadi pada permukaan yang homogen. Menurut Bahrami dkk., (2012) adsorpsi gas menggunakan material berpori tidak hanya melibatkan adsorpsi fisik tetapi juga adsorpsi kimia. Efek ini mungkin disebabkan oleh fakta bahwa pada suhu yang lebih tinggi penurunan situs aktif terjadi akibat lemahnya ikatan.

Hasil dalam penelitian ini sesuai dengan penelitian Delavar dkk., (2012) yang menunjukkan nilai  $q_{\max}$  menurun berturut-turut pada suhu 25, 35 dan 45°C sebesar 0,92; 77,16 dan 72,16 mmol.g<sup>-1</sup>. Penurunan nilai  $q_{\max}$  terjadi seiring dengan meningkatnya suhu, yang mengindikasikan bahwa afinitas adsorben dengan adsorbat semakin turun. Parameter  $1/n$  juga menunjukkan nilai yang



sesuai dengan penelitian yakni mengalami penurunan dan kenaikan berturut-turut pada suhu 25, 35 dan 45°C sebesar 1,14; 1,19 dan 1,15. Hal ini mengindikasikan bahwa permukaan adsorben cenderung homogen sesuai dengan nilai  $1/n$  yang mendekati 1 (Achmad dkk., 2012).

#### 4.3.4.5 Perbandingan terhadap 4 model isoterm adsorpsi

Berdasarkan 4 model isoterm adsorpsi dalam pembahasan sebelumnya, maka data dibuat ringkasan dari perhitungan isoterm adsorpsi. Data ringkasan 4 isoterm adsorpsi ini digunakan untuk menentukan model yang sesuai dalam adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5. Penentuan model isoterm adsorpsi yang sesuai dapat dilihat dari nilai koefisien korelasi  $R^2$  dengan nilai paling besar (Delavar, 2012 dan Khalili dkk., 2013).

Tabel 4.7 Ringkasan dari perhitungan isoterm adsorpsi

Model Isoterm adsorpsi	Parameter	Suhu		
		30°C	40°C	50°C
Langmuir	$q_{\max}$ (mmol.g <sup>-1</sup> )	21,231	17,212	13,550
	$K_L$ (bar <sup>-1</sup> )	2,804	3,724	8,680
	$R^2$	0,9997	0,9925	0,9986
Freundlich	$1/n$	0,160	0,098	0,056
	$K_F$ (mmol.g <sup>-1</sup> )/(bar) <sup>1/n</sup>	15,966	14,035	12,269
	$R^2$	0,9962	0,6860	0,9803
Tempkin	B	2,800	1,488	0,715
	b (J.mol <sup>-1</sup> )	899,693	1748,845	3755,835
	$K_T$ (bar <sup>-1</sup> )	$2,956 \times 10^2$	$1,226 \times 10^4$	$2,784 \times 10^7$
	$R^2$	0,9920	0,6866	0,9778
Sips	$q_{\max}$ (mmol.g <sup>-1</sup> )	21,231	17,212	13,550
	$1/n$	0,969	0,874	0,956
	$K_S$ (bar <sup>-1</sup> )	2,961	5,006	9,905
	$R^2$	0,9624	0,6824	0,9231

Jika dilihat dari data koefisien korelasi keempat Gambar 4.15 sampai Gambar 4.18 dan dari Tabel 4.7 diketahui bahwa adsorpsi gas hidrogen dengan material karbon tertemplat zeolit yang telah di aktivasi dengan perbandingan  $K_2CO_3$ /karbon 1,5 pada suhu 30, 40 dan 50°C mengikuti model Langmuir Hal ini dapat dilihat dari nilai koefisien korelasi  $R^2$  yang memiliki nilai paling besar berturut-turut adalah 0,9927; 0,9925; dan 0,9986.

Nilai parameter konstanta Langmuir ( $K_L$ ) pada suhu sebesar 30, 40 dan 50°C berturut-turut adalah 2,804; 3,724 dan 8,680  $\text{bar}^{-1}$ . Tingginya nilai konstanta Langmuir ( $K_L$ ) menunjukkan afinitas yang tinggi untuk gas hidrogen. Adapun nilai kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_{\max}$ ) sebesar 21,231; 17,212 dan 13,550  $\text{mmol.g}^{-1}$ , nilai tersebut menunjukkan batasan maksimum untuk menyerap hidrogen pada permukaan karbon tertemplat zeolit-Y. Hasil ini menunjukkan bahwa zeolit mengikuti model isoterm adsorpsi Langmuir. Hal ini sesuai dengan asumsi model isoterm Langmuir yaitu pada permukaan zeolit terdapat sejumlah situs aktif yang sebanding dengan luas permukaan adsorben. Pada saat situs aktif belum jenuh terhadap adsorbat, maka peningkatan konsentrasi adsorbat yang dipaparkan akan meningkat secara linier dengan jumlah adsorbat yang teradsorpsi. Akan tetapi, jika situs aktif adsorben telah jenuh dengan adsorbat, maka peningkatan konsentrasi adsorbat yang dipaparkan tidak akan meningkatkan jumlah adsorbat yang teradsorpsi (Mc Kay, 1999). Selain itu proses adsorpsi yang terjadi hanya pada lapisan *monolayer* dengan jumlah terbatas pada tempat yang sama (Foo, 2010). Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Arean dkk., (2007) yang menunjukkan model isoterm adsorpsi Langmuir pada adsorpsi gas hidrogen dengan zeolit (Mg-Na)Y dengan suhu dan tekanan rendah. Panella dkk., (2005) juga menunjukkan model isoterm adsorpsi Langmuir pada adsorpsi gas hidrogen dengan karbon aktivasi dengan suhu ruang dan tekanan rendah.

Pada model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi hanya pada permukaan yang homogen (Bhatia dan Myers, 2006). Hal ini tidak sepenuhnya sesuai dengan isoterm Langmuir, sebab pada adsorben yang telah disintesis menunjukkan bahwa permukaan tidak seluruhnya homogen. Ketidakhomogenan pada adsorben telah dikonfirmasi dengan hasil XRD, yang mana masih terdapat *hump* di  $2\theta \sim 25^\circ$  dengan intensitas yang rendah pada

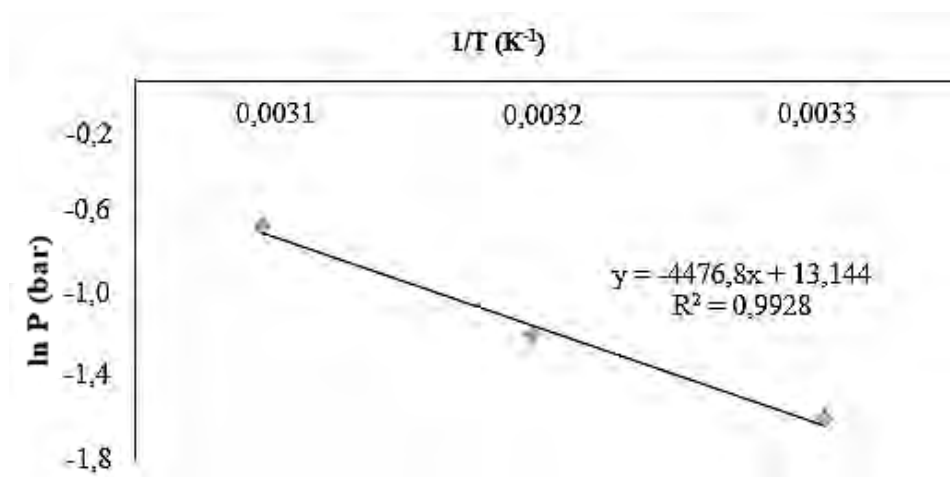
difraktogram karbon tertemplat zeolit setelah aktivasi. Pemusatan gundukan yang melebar (*hump*) pada bidang [002] adalah karakteristik dari karbon grafitik. Konfirmasi dengan SEM juga menunjukkan bahwa permukaan adsorben tidak seluruhnya homogen. Hal ini terlihat pada beberapa bagian adsorben masih ditemukan gumpalan karbon tertemplat zeolit amorf. Hal ini menandakan bahwa masih terdapat bagian karbon tertemplat zeolit yang tidak mampu mereplikasi struktur yang menyerupai partikel zeolit-Y secara sempurna. Selain itu hasil SEM adsorben setelah aktivasi juga menunjukkan hasil bahwa pembentukan karbon amorf tidak seluruhnya menutupi bagian dari karbon berbentuk oktahedral. Hasil tersebut semakin diperkuat dengan analisa BET yang menunjukkan bahwa adsorben memiliki ukuran pori mikro sebanyak 60,873% dan ukuran pori meso sebanyak 39,127% (Anggarini, 2013).

Berdasarkan analisa diatas, maka dapat disimpulkan bahwa adsorben tidak sepenuhnya memenuhi model isoterm Langmuir dan mengindikasikan adanya kesesuaian dengan model isoterm Freundlich. Kesesuaian adsorben dengan isoterm Freundlich telah dibuktikan dari hasil tiga analisa diatas yang menunjukkan permukaan adsorben heterogen. Hal ini juga terlihat pada nilai koefisien korelasi  $R^2$  pada isoterm model Freundlich yang memiliki nilai cukup besar yaitu 0,9962 yang tidak berbeda jauh dengan isoterm Langmuir. Keterbatasan kedua model isoterm tersebut dapat dikonfirmasi melalui model isoterm Sips. Apabila konsentrasi adsorbat rendah menandakan karakteristik isoterm Freundlich, sedangkan pada konsentrasi tinggi menandakan kapasitas karakteristik monolayer isoterm adsorpsi Langmuir. Isoterm Sips tersebut juga menunjukkan nilai koefisien korelasi  $R^2$  yang cukup besar yakni 0,9624. Menurut Levine (2002), seringkali kasus adsorpsi tidak hanya mengikuti pada satu jenis adsorpsi tetapi dapat mengikuti kedua tipe adsorpsi baik fisika atau kimia.

#### **4.3.5 Termodinamika adsorpsi**

Kapasitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh suhu saat adsorben dan adsorbat saling kontak. Seperti dalam pembahasan sebelumnya, adanya peningkatan suhu menyebabkan berkurangnya jumlah dari gas hidrogen yang teradsorp. Pada bahasan ini akan dibahas panas adsorpsi, yaitu panas yang terjadi

akibat ikatan antara adsorbat dan adsorben. Panas adsorpsi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Van't Hoff. Jika panas adsorpsi yang dihasilkan tinggi ( $>80 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ), mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi secara kimia. Adsorpsi kimia terjadi dengan melibatkan panas adsorpsi yang tinggi untuk membentuk ikatan kimia. Sedangkan jika panas adsorpsi yang dihasilkan rendah ( $<80 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ), mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi secara fisik. Adsorpsi fisik yang terjadi melibatkan gaya *van der Waals* dan interaksi elektrostatik yang terdiri dari interaksi polarisasi, dipol, dan quadrupole. Kontribusi gaya *van der Waals* akan selalu ada sedangkan kontribusi elektrostatik yang signifikan hanya ada dalam kasus adsorben seperti zeolit yang memiliki struktur ionik. Selain panas adsorpsi atau entalpi ( $\Delta H^\circ$ ), parameter termodinamik yang akan dikaji adalah entropi ( $\Delta S^\circ$ ) dan perubahan energi bebas Gibbs atau energi adsorpsi ( $\Delta G^\circ$ ). Parameter termodinamika tersebut dihitung menggunakan Persamaan 2.18. Grafik dapat diperoleh dengan memplot antara  $\ln P_{H_2}$  versus  $1/T$  menurut persamaan *Van't Hoff* (Sivakumar,2000). *Slope* akan memberikan garis lurus ( $2\Delta H_H/R$ ), sedangkan *intercept* akan memberikan persamaan  $-(2\Delta S_H/R)$ . Adapun  $\Delta G^\circ$  dapat dihitung dengan Persamaan 2.19. Grafik yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Grafik  $\ln P$  vs  $1/T$

Tabel 4.8 Parameter termodinamika adsorpsi gas hidrogen pada meterial karbon tertemplat zeolit-Y

Suhu	P <sub>o</sub> (bar)	P <sub>eq</sub> (bar)	$\Delta H^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	$\Delta G^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )
30°C	1	0.2	-18,610	-54,640	-2,054
40°C	1	0.3			-1,058
50°C	1	0.5			-0,961

Dari perhitungan, maka didapatkan data  $\Delta H^\circ$  sebesar -18,610 kJ.mol<sup>-1</sup>. Nilai negatif pada entalpi menandakan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara eksotermis. Berdasarkan nilai  $\Delta H^\circ$  yang diperoleh, hal ini menguatkan dugaan bahwa adsorpsi gas hidrogen dengan karbon tertemplat zeolit-Y sesuai dengan adsorpsi fisika yakni harga entalpi <80 kJ.mol<sup>-1</sup>. Menurut Ruthven (1984), adsorpsi fisik dari fase gas bersifat eksotermis. Sifat eksotermis ini menyebabkan jumlah adsorbat yang teradsorp pada permukaan adsorben turun seiring dengan naiknya suhu adsorpsi (Zulfa, 2008). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan penurunan kapasitas adsorpsi pada suhu 30, 40 dan 50°C berturut-turut yaitu 3,206; 2,885 dan 2,458% berat.

Kapasitas adsorpsi gas hidrogen yang besar dapat diperoleh dengan nilai perubahan energi bebas yang negatif, hal ini karena  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ . Jika nilai energi bebas negatif, maka perlu  $\Delta H$  yang negatif pula agar proses adsorpsi bisa berlangsung spontan atau dapat disebut adsorpsi eksotermis (Ruthven, 1984). Nilai  $T\Delta S$  harus lebih negatif atau lebih kecil dari nilai  $\Delta H$ , hal ini agar nilai  $\Delta G$  negatif dan reaksi adsorpsi berlangsung spontan. Oleh karena itu apabila suhu dinaikkan, maka akan menyebabkan nilai dari  $\Delta G$  menjadi berkurang atau ke arah yang positif, sehingga adsorpsi tidak dapat terjadi.

Delavar dkk., (2012) menjelaskan bahwa panas adsorpsi dipengaruhi oleh tingkat muatan gas pada permukaan adsorben. Saat permukaan yang tertutup adsorbat sedikit, akan terjadi interaksi yang kuat antara adsorbat dan sisi aktif dari permukaan. Namun saat adsorbat pada permukaan meningkat, interaksi antara adsorbat dengan permukaan adsorben menurun. Penurunan ini disebabkan oleh pengisian pori, sehingga entalpi adsorpsi menjadi turun (Delavar dkk., 2012).

Pada penelitian ini entropi adsorpsi ( $\Delta S^\circ$ ) yang diperoleh sebesar  $-54,640 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Nilai negatif menandakan penurunan ketidakteraturan permukaan gas-solid saat proses adsorpsi. Adanya penurunan derajat ketidakteraturan pada sistem adsorben dengan adsorbat, menyebabkan molekul gas hidrogen yang terserap pada adsorben semakin teratur, begitu pula sebaliknya (Kubilay, dkk., 2007). Fenomena ini dalam sistem adsorpsi tidak menguntungkan, karena dapat menurunkan kestabilan ikatan antara adsorben dan adsorbat. Adapun nilai entropi yang dihasilkan bertanda negatif, sesuai dengan pernyataan Ruthven (1984) yang telah dibahas sebelumnya. Nilai energi bebas Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) yang didapatkan bernilai negatif, yaitu sebesar  $-2,054$ ;  $-1,058$  dan  $-0,961 \text{ kJ.mol}^{-1}$  pada variasi suhu  $30$ ,  $40$  dan  $50^\circ\text{C}$  berturut-turut. Nilai negatif mengindikasikan bahwa adsorpsi berlangsung spontan tanpa memerlukan tambahan energi dari luar. Nilai perubahan energi bebas Gibbs ini semakin naik seiring dengan naiknya suhu. Parameter termodinamika yang didapatkan dalam penelitian ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Sivakumar dkk., (2000) yang mengadsorpsi hidrogen menggunakan material *alloy*  $\text{Tb}_{1-x}\text{Zr}_x\text{Fe}_3$ . Hasil menunjukkan bahwa adsorpsi hidrogen bersifat eksotermis dengan nilai entalpi adsorpsi sebesar  $-(8 - 28) \text{ kJ.mol}^{-1}$  dan nilai entropi sebesar  $-(32 - 66) \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa karbon tertemplat zeolit-Y yang telah diaktivasi dengan rasio perbandingan  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 mampu menyimpan hidrogen yang besar pada suhu  $30^\circ C$  dan tekanan 3 bar yaitu sebesar 3,821% berat atau 19,107 mmol.g<sup>-1</sup>. Kapasitas penyimpanan hidrogen mengalami peningkatan seiring dengan turunnya suhu dan naiknya tekanan yang digunakan pada proses adsorpsi. Secara umum material ini mencapai keadaan setimbang diatas menit ke-70 pada tiap variasi suhu dan tekanan.

Hasil isoterm adsorpsi yang paling sesuai untuk adsorpsi gas hidrogen pada material karbon tertemplat zeolit-Y teraktivasi  $K_2CO_3$  adalah model isoterm adsorpsi Langmuir. Parameter termodinamika juga ditentukan dalam penelitian ini. Nilai negatif dari perubahan energi bebas Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) sebesar -2,054 kJ.mol<sup>-1</sup> pada suhu  $30^\circ C$  menandakan proses adsorpsi berlangsung spontan. Proses adsorpsi berlangsung secara eksotermis yang dibuktikan melalui nilai negatif dari perubahan entalpi ( $\Delta H^\circ$ ) sebesar -18,610 kJ.mol<sup>-1</sup>. Perubahan entropi ( $\Delta S^\circ$ ) bernilai negatif sebesar -54,6396 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, nilai tersebut menandakan penurunan ketidakteraturan permukaan gas-solid selama proses adsorpsi.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa adsorpsi gas hidrogen dengan karbon tertemplat zeolit-Y sesuai dengan adsorpsi fisika yakni harga entalpi adsorpsi <80 kJ.mol<sup>-1</sup>. Nilai perubahan entalpi ( $\Delta H^\circ$ ) dalam penelitian ini memiliki nilai yang lebih tinggi dari panas pencairan hidrogen, sehingga material karbon tertemplat zeolit-Y aktivasi  $K_2CO_3$  potensial untuk digunakan sebagai material penyimpan hidrogen. Meskipun kapasitas adsorpsi yang dihasilkan material tersebut masih belum memenuhi target DoE hingga tahun 2017 sebesar 5,5-7,5% berat.



## 5.2 Saran

Kapasitas penyimpanan hidrogen dalam penelitian ini dapat ditingkatkan hingga 3,821% berat pada kondisi suhu 30°C dan tekanan 3 bar. Kapasitas penyimpanan ini masih dibawah standar yang ditetapkan oleh Department of Energy (DoE) yaitu sebesar 5,5-7,5% berat. Oleh karena itu perlu dilakukan studi lebih lanjut antara lain mengenai :

1. Perlu dilakukan optimasi massa adsorben yang digunakan untuk proses adsorpsi, hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh massa adsorben terhadap nilai kapasitas penyimpanan hidrogen.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai variasi kondisi adsorpsi hidrogen pada tekanan sesuai prasyarat DoE dalam aplikasi penyimpanan hidrogen yang memberikan target tekanan 3-12 bar. Jika material karbon tertemplat zeolit ini dioptimalkan hingga tekanan sesuai prasyarat DoE, maka diharapkan material mengalami peningkatan kapasitas penyimpanan hidrogen sesuai dengan standar yang telah ditetapkan DoE tahun 2017 yaitu mencapai 5,5-7,5% berat.
3. Prasyarat DoE dalam aplikasi penyimpanan hidrogen memberikan target tekanan 3-12 bar. Sehingga jika material karbon tertemplat zeolit ini dioptimalkan hingga tekanan sesuai prasyarat DoE, maka kemungkinan akan dihasilkan kapasitas penyimpanan hidrogen yang lebih besar. Akan tetapi tekanan yang sesuai dengan tekanan ruang lebih diharapkan, sebab tekanan tinggi akan membutuhkan biaya mahal dan resiko yang besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, A. Kassim, J. Suan, T.K. Amat, R.C. Seey, T.L. (2012), "Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies on the Adsorption of Direct Dye onto a Novel Green Adsorbent Developed from Uncaria Gambir Extract", *Journal of Physical Science*, Vol. 23, hal. 1-13.
- Adamson, A.W. Gast, A.P. (1997), *Physical Chemistry of Surfaces, Sixth Edition*, Wiley-Interscience, New York.
- Adinata, D, Daud, Wan, M.A.W., Aroua, Mohd, K., (2007), "Preparation and Characterization of Activated Carbon from Palm Shell by Chemical Activation with  $K_2CO_3$ ", *Journal of Bioresource Technology*, Vol. 98, hal. 145-149.
- Agarwal, R.K. Noh, J.S. Schwarz, J.A. Davini, P. (1987), "Effect of Surface Acidity of Activated Carbon on Hydrogen Storage", *Carbon*, Vol. 25, hal. 219-226.
- Ahluwalia, R.K. Huaa T.Q. Peng, J.K. Lasher, S. McKenney, K. Sinha, J. Gardiner, M. (2010), "Technical Assessment of Cryo-compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications, ", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, hal. 4171-4184.
- Akasaka, Hiroki. Takahata, Tomokazu. Toda, Ikumi. Ono, Hiroki. Ohshio, Shigeo. Himeno, Syuki. Kokubu, Toshinori. Saitoh, Hidetoshi. (2011), "Hydrogen Storage Ability of Porous Carbon Material Fabricated from Coffee Bean Wastes", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, hal. 580-585.
- Alam, Nurul. dan Mokaya, Robert. (2011), "Characterisation and Hydrogen Storage of Pt-doped Carbons Templated by Pt-exchanged Zeolite Y", *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 142, hal. 716-724.
- Alam, Nurul. dan Mokaya, Robert. (2011a), "The Effect of Al Content OF Zeolite Template on The Properties and Hydrogen Storage Capacity of Zeolite Templated Carbons", *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 144, hal. 140-147.
- Alberty, R.A. (1990), *Kimia Fisika, Jilid Kesatu*, Erlangga, Jakarta.
- Ananthachar, Vinay. Duffy, John J. (2005), "Efficiencies of Hydrogen Storage Systems Onboard Fuel Cell Vehicles", *Solar Energy*, Vol. 78, hal. 687-694.
- Anggarini, Ufafa. (2013), *Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi  $K_2CO_3$  sebagai Material Penyimpan Hidrogen*, Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

- Areán, C. Otero. Delgado, M. Rodríguez. Palomino, G. Turnes. Rubio, M. Tomás. Tsyganenko, N.M. Tsyganenko, A.A. Garrone, E. (2005), "Thermodynamic Studies on Hydrogen Adsorption on The Zeolites Na-ZSM-5 and K-ZSM-5", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 80, hal. 247-252.
- Areán, C. Otero. Manoilova, O.V. Bonelli, B. Delgado, M. Rodríguez. Palomino, G. Turnes. Garrone, E. (2003), "Thermodynamics of Hydrogen Adsorption on The Zeolite Li-ZSM-5", *Chemical Physics Letters*, Vol. 370, hal. 631-635.
- Areán, C. Otero. Palomino, G. Turnes. Carayol, M.R. Llop, Pulido, A. Rubeš, M. Bludský, O. Nachtigall, P. (2009), "Hydrogen Adsorption on The Zeolite Ca-A: DFT and FT-IR Investigation", *Chemical Physics Letters*, Vol. 2009, hal. 139-143.
- Areán, C. Otero. Palomino, G. Turnes. Carayol, M.R. Llop. (2007), "Variable Temperature FT-IR Studies on Hydrogen Adsorption on The Zeolite (Mg,Na)-Y", *Journal of Applied Surface Science*, Vol. 253, hal. 5701-5704.
- Armandi, M., Bonelli, B., Bottero, I., Arean, Otero, C., Garrone, E., (2007), "Synthesis and characterization of ordered porous carbons with potential applications as hydrogen storage media", *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Vol 103, hal 150 – 157.
- Assfour, Bassem. Leoni, Stefano. Yurchenko, Sergei. Seifert, Gotthard. (2011), "Hydrogen Storage in Zeolite Imidazolate Frameworks. A Multiscale Theoretical Investigation", *International Journal of Hydrogen Storage*, Vol. 36, hal. 6005-6013.
- Atkins, P.W. (1996), *Kimia Fisik-Terjemahan Irma I. Kartohadiprodjo*, Jilid 2, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta.
- Auerbach, Scott M. Carrado, Kathleen A. dan Dutta, Prabir K. (2003), *Handbook of Zeolite Science and Technology*, CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Baerlocher, Christian. McCusker, Lynne B. Olson, D.H. (2007), *Atlas of Zeolite Framework Types, 6<sup>th</sup> Revised Edition*, Structure Commission of The International Zeolite Association, USA Elsevier.
- Bahrami, H. Safdari, J. Ali, M. Moosavian, Torab-Mostaedi, M. (2012), "Adsorption of Hydrogen Fluoride Onto Activated Carbon Under Vacuum Conditions: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Investigations", *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, Vol. 18, hal. 497-508.

- Balat, Mustafa (2008), “Potential Importance of Hydrogen as a Future Solution to Environmental and Transportation Problems”, *International Journal of Hydrogen*, Vol. 33, hal. 4013-4029.
- Balat, Mustafa. (2005), “Current Alternative Engine Fuels”, *Energy Sources Part A*, Vol. 27, hal. 569.
- Bansal, Roop Chand and Goyal, Meenakshi (2005), *Activated Carbon Adsorption*, Taylor and Francis Group, New York.
- Barghi, Seyed Hamed, Tsotsis, Theodore T. Sahimi, Muhammad. (2014), “Chemisorption, Physisorption, and Hysteresis During Hydrogen Storage in Carbon Nanotubes”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, hal. 1390-1397.
- Belgian Academy Council of Applied Science (BACAS). (2006), *Hydrogen as an Energy Carrier*, BACAS Report, Brussels.
- Belhachemi, M. dan Addoun, F. (2011), “Comparative Adsorption Isotherms and Modeling of Methylene Blue Onto Activated Carbons”, *Appl Water Science*, Vol. 1, hal. 111-117.
- Bénard, Pierre dan Chahine, R. (2001), “Modeling of Adsorption Storage of Hydrogen on Activated Carbons”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, hal. 849-855.
- Bhatia, S.K. Myers, A.L. (2006), “Optimum Conditions for Adsorptive Storage”, *Langmuir*, Vol. 22, hal. 1688-1700.
- Blanco, A.A. García. Vallone, A.F. Gil, A. Sapag, K. (2012), “A Comparative Study of Various Microporous Materials to Store Hydrogen by Physical Adsorption”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, hal. 14870-14880.
- Böhme, K. Einicke, W.D. Klepel, O. (2005), “Templated Synthesis of Mesoporous Carbon from Sucrose-The Way from The Silica Pore Filling to The Carbon Material”. *Carbon*, Vol. 43, hal. 1918–1925.
- Breck, D.W. (1974), *Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use*, Willey, New York, USA.
- British Petroleum (2014), *BP Energy Outlook 2035-January 2014*, London, United Kingdom.
- Broom, Darren. P. (2011), *Hydrogen Storage Materials-The Characterisation Their Storage Properties*, Springer London Dordrecht Heidelberg, New York.
- Cai, Jinjun. Yang, Menglong. Xing, Yanlong. Zhao, Xuebo. (2014), “Large Surface Area Sucrose-Based Carbons via Template-Assisted Routes: Preparation, Microstructure, and Hydrogen Adsorption Properties”,

- Colloids and Surfaces A: Physicochemistry Engineering Aspects*, Vol. 444, hal. 240-245.
- Calleja, G. Botas, J.A. Sánchez-Sánchez, M. Orcajo, M.G.(2010), “Hydrogen Adsorption Over Zeolite-Like MOF Materials Modified by Ion Exchange”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, hal. 9916-9923.
- Chahine, R. Bose, T.K. (1994), “Low-Pressure Adsorption Storage of Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 19, hal. 161-164.
- Chen, Louis. Singh, Ranjeet K. Webley, Paul. (2007), “Synthesis, Characterization and Hydrogen Properties of Microporous Carbons Templated by Cation Exchanged Forms of Zeolite Y with Propylene and Butylene as Carbon Precursors”, *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 102, hal. 159 – 170
- Chen, P. (2012), “Hydrogen Storage: Liquid and Chemical”, *Comprehensive Renewable Energy*, Vol.4, hal. 157-177.
- Chung, Kyong-Hwan. (2010), “High-Pressure Hydrogen Storage on Microporous Zeolites with Varying Pore Properties”, *Energy*, Vol. 35, hal. 2235-2241.
- Cipriani, Giovanni. Dio, V.D. Genduso, Fabio. Cascia, Diego La. Liga, Rosario. Miceli, Rosario. Galluzzo, G.R. (2014), “Review : Perspective on Hydrogen Energy Carrier and Its Automotive Applications”, *International Journal of Hydrogen*, hal. 1-13.
- Corbo, dkk. (2011), “Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles, Chapter 2 Hydrogen as Future Energy Carrier”, *Green Energy and Technology*, Springer-Verlag London, Ltd.
- Cordero, T. Thrower, P.A. Radovic, L.R. (1992), “On the Oxidation Resistance of Carbon-Carbon Composites Obtained by Chemical Vapour Infiltration of Different Carbon Cloths”, *Journal of Carbon*, Vol. 30, hal. 365-374.
- Cotton, F.A. dan Wilkinson, G. (2009), *Kimia Anorganik*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- De La Casa-Lillo, M.A. Lamari-Darkrim, F. Cazorla-Amorós, D. dan Linares-Solano, A. (2002), “Hydrogen Storage in Activated Carbons and Activated Carbon Fibers”, *Carbon*, Vol. 106, hal. 10930-10934.
- Delavar, Maedeh. Ghoreyshi, Ali Asghar. Jahanshahi, Mohsen. Khalili, Soudabeh. Nabian, Nima. (2012), “Equilibrium and Kinetics of Natural Gas Adsorption on Multi-walled Carbon Nanotube Material”, *RSC Advances*, Vol. 2, hal. 4490-4497.
- Deng, Hui. Li, Guoxue. Yang, Hongbing. Tang, Jiping. Tang, Jiangyun. (2010), “Preparation of Activated Carbons from Cotton Stalk by Microwave

- Assisted KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Activation”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 163, hal. 373-381
- Derwent, R. Simmonds, P. O’Doherty, S. Manning, A. Collins, W. Stevenson, D. (2006), “Global Environmental Impacts of The Hydrogen Economy”, *International Journal Nuclear Hydrogen Production and Application*, Vol.1 , hal. 57-67.
- Dong, Jinxiang. Wang, Xiaoyan. Xu, Hong. Zhao, Qiang. Li, Jinping. (2007), “Hydrogen Storage in Several Microporous Zeolites”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, hal. 4998-5004.
- Dunker, Alam M. dan Ortmann, Jerome P. (2006), “Kinetic Modeling of Hydrogen Production by Thermal Decomposition of Methane”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, hal. 1989-1998.
- Durbin, D.J. Malardier-Jugroot, C. (2013), “Review of Hydrogen Storage Techniques for on Board Vehicle Applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, hal. 14595-14617.
- Dutta, Suman. (2013), “A Review on Production, Storage of Hydrogen and Its Utilization as an Energy Resource, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 1478, hal. 1-9.
- Edwards, P.P. Kuznetsov, V.L. dan David, W.I.F. (2007), “Hydrogen Energy”, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol. 365, hal. 1043-1056.
- Encarta Online, (2001), *Carbon*, <http://www.chem.uwec.edu>.
- Foo, K.Y. dan Hameed, B.H. (2011), “The Environmental Application of Activated Carbon/Zeolite Composite Materials”, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 162, hal. 22-28.
- Foo, K.Y. dan Hameed, B.H. (2010), “Review: Insights Into the Modeling of Adsorption Isotherm Systems”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 156, hal. 2-10.
- Froudakis, George E. (2011), “Hydrogen Storage in Nanotubes & Nanostructures”, *Materials Today, July-August*, Vol. 14, No. 7-8. ISSN : 13697021 Elsevier, Ltd.
- Fujiwara, Masahiro. Fujio, Yoshiharu, Sakurai, Hiroaki, Senoh, Hiroshi, Kiyobayashi, Tetsu. (2014), “Storage of Molecular Hydrogen Into ZSM-5 Zeolite in the Ambient Atmosphere by the Sealing of the Micropore Outlet”, *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 79, hal. 1-6.
- García, A. Nieto, A. Vila, M. Vallet-Regí, M. (2013), “Easy Synthesis of Ordered Mesoporous Carbon Containing Nickel Nanoparticles by a Low Temperature Hydrothermal Method”, *Carbon*, Vol. 51, hal. 410-418.

- Garrone, E. Bonelli, B. dan Areán, C. Otero (2008), "Enthalpy-entropy Correlation for Hydrogen Adsorption on Zeolites", *Chemical Physics Letters*, Vol. 456, hal. 68-70.
- Gigras, A. Bhatia, S.K. Anil Kumar, A.V. dan Myers, A.L. (2007), "Feasibility of Tailoring for High Isothermic Heat to Improve Effectiveness of Hydrogen Storage in Carbons, *Carbon*, Vol. 45, hal. 1043-1050.
- Granovskii, Mikhail. Dincer, Ibrahim. Rosen, M.A. (2007), "Exergetic Life Cycle Assessment of Hydrogen Production from Renewables", *Journal of Power Sources*, Vol. 167, hal. 461-471.
- Gregg, S. J. Dan Sing, S. K. W., (1982), *Adsorption, Surface Area, and Porosity*, Second edition, Academic Press, New York.
- Gross, K.J. dan Carrington, K.R. (2008), *Recommended Best Practices for The Characterization of Storage Properties of Hydrogen Storage Materials*, December 2008.
- Guan, C. Wang, K. Yang, C. Zhao, X.S. (2009), "Characterization of a Zeolite-Templated Carbon for H<sub>2</sub> Storage Application", *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 118, hal. 503-507.
- Guan, C. Zhang, X. Wang, K. Yang, C. (2009), "Investigation of H<sub>2</sub> Storage in a Templated Carbon Derived from Zeolite Y and PFA", *Separation and Purification*, Vol. 66, hal. 565-569.
- Guo, Z.X. Shang, C. Aguey-Zinsou, K.F. (2008), "Materials Challenges for Hydrogen Storage", *Journal of The European Ceramic Society*, Vol. 28, hal. 1467-1473.
- Hamad, B.K, Noor, A. Rahim, A. (2011), "Removal of 4-Chloro-2-Methoxyphenol from Aqueous Solution by Adsorption to Oil Palm Shell Activated Carbon Activated with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>", *Journal of Physical Science*, Vol. 22, hal. 39-55.
- Han, Sang Soo, Choi, Seung-Hoon, dan Goddard, William A. (2011), "Improved H<sub>2</sub> Storage in Zeolitic Imidazolate Frameworks Using Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, and K<sup>+</sup> Dopants, with an Emphasis on Delivery H<sub>2</sub> Uptake", *Journal of Physics Chemistry C*, Vol. 115, hal. 3507-3512.
- Hauchhum, Lalhmingsanga dan Mahanta, Pinakeswar. (2014), "Kinetic, Thermodynamic, and Regeneration Studies for CO<sub>2</sub> Adsorption onto Activated Carbon", *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, Vol. 4, hal 27-32.
- Hayashi, Jun'ichi. Uchibayashi, Mikihiro. Horikawa, Toshihide. Muroyama, Katsuhiko. Gomes, Vincent G. (2002), "Synthesizing Activated Carbons from Resins by Chemical Activation with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>", *Journal of Carbon*, Vol. 40, hal. 2747-2752.

- Hirscher, Michael, (2009), *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*. WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Germany.
- Hwang, Hyun Tae dan Varma, Arvind. (2014), "Hydrogen Storage for Fuel Cell Vehicles", *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol.5, hal. 42-48.
- Im, Ji Sun. Park, Soo-Jin. Kim, Tae Jin. Kim, Young Ho. Lee, Young-Seak. (2008), "The Study of Controlling Pore Size on Electrospun Carbon Nanofibers for Hydrogen Storage", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 318, hal. 42-49.
- International Energy Agency (2013), *Key World Energy Statistics*, SOREGRAPH, France.
- Ioannatos, Gerasimos E. dan Verykios, Xenophon E. (2010), "H<sub>2</sub> Storage on Single- and Multi-Walled Carbon Nanotubes", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, hal. 622-628.
- Jiménez, V. Ramírez-Lucas, A. Sánchez, P. Valverde, J.L. Romero, A. (2012), "Hydrogen Storage in Different Carbon Materials: Influence of the Porosity Development by Chemical Activation", *Applied Surface Science*, Vol. 258, hal. 2498-2509.
- Joo S.H. Jun S. Ryoo R. (2001), "Synthesis of Ordered Mesoporous Carbon Molecular Sieves CMK-1", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 44-45, hal. 153-158.
- Jordá-Beneyto, M. Lozano-Castelló, D. Suárez-García, F. Cazorla-Amorós, D. Linares-Solano, Á. (2007), "Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressures", *Carbon*, Vol.45, hal. 293-303.
- Jordá-Beneyto, M. Lozano-Castelló, D. Suárez-García, F. Cazorla-Amorós, D. Linares-Solano, Á. (2008), "Advanced Activated Carbon Monoliths and Activated Carbons for Hydrogen Storage", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol.112, hal. 235-242.
- Kalanidhi, A. (1988), "Boil-off in Long-term Stored Liquid-Hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 13, hal. 311-313.
- Kayadoe, Victor, (2013), "Sintesis dan Karakterisasi Karbon Ter-*template* Zeolit NaY dengan Prekursor Sukrosa Sebagai Material Penyimpan Hidrogen", Tesis Program Magister Kimia-FMIPA, ITS
- Keller, Jürgen. dan Staudt, Reiner. (2005), *Gas Adsorption Equilibria: Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*, Springer Science and Business Media, Inc., New York, USA.



- Khalili, S. Asghar, A. Ghoreyshi, Jhanshahi, M. (2013), "Carbon dioxide Captured by Multiwalled Carbon Nanotube and Activated Charcoal: A Comparative Study", *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, Vol. 19, hal 153-164.
- Khedr, S. Shouman, M. Fathy, N. Attia, A. (2014), "Effect of Physical and Chemical Activation on the Removal of Hexavalent Chromium Ions Using Palm Tree Branches", *ISRN Environmental Chemistry*, Vol. 2014, hal. 1-11.
- Kiliç, Murat. Apaydin-Varol. Esin, Pütün. Ayşe Eren. (2012), "Preparation and Surface Characterization of Activated Carbons from Euphorbia Rigida by Chemical Activation with  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ", *Journal of Applied Surface Science*, Vol. 261, hal. 247-254.
- Klebanoff, Lennie. (2013), *Hydrogen Storage Technology: Materials and Applications*, CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Klug, Harold P. dan Alexander, L. E. (1974), *X-Ray Diffraction Procedures: for Polycrystalline and Amorphous Materials*, John Wiley & Sons, New York.
- Konwar, Ruhit Jyoti. De, Mahuya. (2013), "Effects of Synthesis Parameters on Zeolite Templated Carbon for Hydrogen Storage Application", *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 175, hal. 16-24.
- Kotay, S.M. Das, D. (2008). "Biohydrogen as a Renewable Energy Source-Prospects and Potentials", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, hal. 258.
- Kovo, Abdulsalami Sanni. (2011). "Development of Zeolites and Zeolite Membranes from Ahoko Nigerian Kaolin", Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy in The Faculty of Engineering and Physical Sciences, The University of Manchester.
- Kubilay, S. Gurkan, R. Savran, A. Sahan, T. (2007), "Removal of Cu(II), Zn(ii) and Co(II) ions from Aqueous Solutions by Adsorption onto Natural Bentonite", *Adsorption*, Vol. 13, hal. 41-51.
- Kyotani, Takashi. Ma, Zhixin. Tomita Akira. (2003), "Template Synthesis of Novel Porous Carbons using Various Types of Zeolites", *Journal of Carbon*, Vol. 41, hal. 1451-1459.
- Langmi, H.W. Book, D. Walton, A. Johnson, S.R. Al-Mamouri, M.M. Speight, J.D. Edwards, P.P. Harris, I.R. dan Anderson, P.A. (2005), "Hydrogen Storage in Ion-Exchanged Zeolites", *Journal Alloys Compounds*, Vol. 404-406, hal. 637-642.
- Langmi, H.W. Walton, A. Al-Mamouri, M.M. Johnson, S.R. Book, D. Speight, J.D. Edwards, P.P. Gameson, I. Anderson, P.A. Harris, I.R. (2003),

- “Hydrogen Adsorption in Zeolites A, X, Y and RHO”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 356-357, hal. 710-715.
- Lee, Jinwoo. Kim, Jaeyun, dan Hyeon, Taeghwan. (2006), : Recent Progress in the Synthesis of Pororus Carbon Materials”, *Advanced Materials*, Vol. 18, hal. 2073-2094.
- Lee, Seul-yi, Park, Soo-Jin, (2012), “Synthesis of Zeolite-Casted Microporous Carbons and Their Hydrogen Storage Capacity”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Article in Press.
- Li, Jang dan Wu, E (2009), “Adsorption of Hydrogen on Porous Materials of Activated Carbon and Zeolite NaX Crossover Critical Temperature”, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 49, hal. 196-202.
- Li, Yingwei. dan Yang, Ralph.T. (2006), “Hydrogen Storage in Low Silica Type X Zeolites”, *Journal of Physics Chemistry*, Vol. 110, hal. 17175-17181.
- Lim, K.L. Kazemian, H. Yaakob, Z. Daud, W.R.W. (2010), “Review: Solid-State Materials and Methods for Hydrogen Storage: A Critical Review”, *Chemical & Engineering Technology*, Vol. 33, hal. 213-226.
- Liu, Xiuying. He, Jie, dan Li, Rui. (2012), “High-Pressure Hydrogen Adsorption in the Zeolites: A Grand Canonical Monte Carlo Study”, *International Scholarly Research Network Renewable Energy*, Vol. 2012, hal. 1-4.
- Lukić, I. Kristić, J. Glišić, S. Jovanović, D. Skala, D. (2010), “Biodiesel Synthesis Using  $K_2CO_3/Al-O-Si$  Aerogel Catalysts”, *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol. 75, hal. 789-801.
- Ma, Z. Kyotani, T. Liu, Z. Terasaki, O. Tomita, A. (2001), “Very High Surface Area Microporous Carbon with a Three-Dimensional Nanoarray Structure: Synthesis and Its Molecular Structure”, *Chemistry of Materials*, Vol. 13, hal. 4413-4415.
- Mariolakos, I. Karnich, A. Markatselis, E. (2007), “Paper orgru M, Water, Mythology and Environmental Education, *Desalination*, Vol. 213, hal. 141.
- Masika, Eric dan Mokaya, Robert. (2013), “Preparation of Ultrahigh Surface Area Porous Carbons Templated Using Zeolite 13X for Enhanced Hydrogen Storage”, *Progress in Natural Science:Materials International*, Vol. 23, hal. 308-316.
- Masika, Eric dan Mokaya, Robert. (2013a), “Exceptional Gravimetric and Volumetric Hydrogen Storage for Densified Zeolite Templated Carbons with High Mechanical Stability”, *Energy and Environmental Science*, hal. 1-8.

- McKee, Douglas W. (1983), "Mechanisms of The Alkali Metal Catalysed Gasification of Carbon", *Fuel*, Vol. 62, hal. 170-175.
- Meyer, C.J. Shah, S.D.Patel, S.C. Sneeringer, R.M. Bessel, C.A. Dollahan, N.R. (2001), "Templated Synthesis of Carbon Materials from Zeolite (Y, Beta, and ZSM5) and a montmorillonite clay (K10): Physical and Electrochemical Characterization", *Journal of Physics Chemistry*, Vol. 105, hal. 2143-2152.
- Minoda, Ai. Oshima, Shinji. Iki, Hideshi, Akiba, Etsuo. (2014), "Hydrogen Storage Capacity of Lithium-Doped KOH Activated Carbons", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 606, hal. 112-116.
- Momirlan, Magdalena dan Veziroglu, T.N. (2005), "The Properties of Hydrogen as a Fuel Tomorrow in Sustainable Energy System for a Cleaner Planet", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, hal. 795-802.
- Mulder, M. (1996), *Basic Principles of Membran Technology*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
- Ni, M. Leung, M.K.H. Sumathy, K. Leung, D.Y.C. (2006), "Potential of Renewable Hydrogen Production for Energy Supply in Hongkong", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, hal. 1401-1412.
- Nishihara, H. dan Kyotani, T. (2009), Novel Carbon Adsorbents-Chapter 10: Zeolite-Templated Carbon—Its Unique Characteristics and Applications", Institut for Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Katahira, Sendai, Japan.
- Nishihara, H. Hou, P. Li, L. Ito, M. Uchiyama, M. Kaburagi, T. Ikura, A. Katamura, J. Kawarada, T. Mizuuchi, K. dan Kyotani, T. (2009), "High-Pressure Hydrogen Storage in Zeolite-Templated Carbon", *Journal of Physics Chemistry C*, Vol. 113, hal. 3189-3196.
- Ojha, K. Pradhan, N.C. Samantha, A.N. (2004), "Zeolite from Fly Ash: Synthesis and Characterization", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 27, hal. 555-564.
- Okada, K. Yamamoto, N. Kameshima, Y. Yasumori, A. (2003), "Porous Properties of Activated Carbons from Waste Newspaper Prepared by Chemical and Physical Activation", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 262, hal. 179-193.
- Oliveira, L.C.A. Pereira, E. Guimaraes, L.R. Vallone, A.Pereira, M. Mesquita, J.P. Sapag, K. (2009), "Preparation of Activated Carbons from Coffee Husks Utilizing  $\text{FeCl}_3$  and  $\text{ZnCl}_2$  as Activating Agents", *Journal of Hazardous Material*, Vol. 165, hal. 87-94.

- Oriňáková, Renáta dan Oriňák, Andrej. (2011), "Recent Applications of Carbon Nanotubes in Hydrogen Production and Storage", *Fuel*, Vol. 90, hal. 3123-3140.
- Orthmer, Kirk. (1991), *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4<sup>th</sup> ed. Willey, New York, USA.
- Otowa, T. Tanibata, R. Itoh, M. (1993), "Production and Adsorption Characteristics of MAXSORB: High Surface Area Activated Carbon", *Gas Separation and Purification*, Vol. 7, hal. 241-245.
- Palomino, G. Turnes. Areán, C. Otero. Carayol, M.R. Llop. (2010), "Hydrogen Adsorption on The Faujasite-Type Zeolite Mg-X: An IR Spectroscopic and Thermodynamic Study", Vol. 256, hal. 5281-5284.
- Palomino, G. Turnes. Carayol, M.R. Llop, Areán, C. Otero. (2008), "Thermodynamics of Hydrogen Adsorption on The Zeolite Ca-Y", *Catalysis Today*, Vol. 138, hal. 249-252.
- Panella, B. Hirscher, M. dan Roth, S. (2005), "Hydrogen Adsorption in Different Carbon Nanostructures", *Carbon*, Vol. 43, hal. 2209-2214.
- Parker, S.P, 1993, *Encyclopedia of Chemistry, Second Edition*, New York: Mc Graw-Hill Book Company.
- Prasanth, K.P. Pillai, Renjith. S. Bajaj, H.C. Jasra, R.V. Chung, H.D. Kim, T.H. Song, S.D. (2008), "Adsorption of Hydrogen in Nickel and Rhodium Exchanged Zeolite X", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, hal. 735-745.
- Prihandana, Rama dan Hendroko, Roy (2008), *Energi Hijau: Pilihan Bijak Menuju Negeri Mandiri Energi*, Penebar Swadaya, Jakarta.
- Principi, G. Agresti, F. Maddalena, A. Russo, S.Lo. (2009), "The Problem of Solid State Hydrogen Storage", *Energy*, Vol. 34, hal. 2087-2091.
- PUSDATIN ESDM (2012), *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*, CDI-EMR, Jakarta.
- Rahmati, Mahmoud dan Modarress, Hamid. (2009), "Grand Canonical Monte Carlo Simulation of Isotherm for Hydrogen Adsorption on Nanoporous Siliceous Zeolites at Room Temperature", *Applied Surface Science*, Vol. 255, hal. 4773-4778.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (1999), *Adsorption by powders and porous solids: Principles, methodology, and applications*. Academic Press, San Diego.
- Rzepka, M. Lamp, P. De La Casa-Lillo, M.A. (1998), "Physisorption of Hydrogen on Microporous Carbon and Carbon Nanotubes", *Journal of Physics Chemistry B*, Vol. 102, hal. 10894-10898.

- Saha, Dipendu. Wei, Zuojun. Deng, Shuguang. (2008), "Equilibrium, Kinetics, and Enthalpy of Hydrogen Adsorption in MOF-177", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, hal. 7479-7488.
- Sakintuna, Billur. Darkrim, F.L. Hirscher, M. (2007), "Metal Hydride Materials for Solid Hydrogen Storage: A Review", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, hal. 1121-1140.
- Sakintuna, Billur. Weinberger, B. Lamari-Darkrim, F. Hirscher, M. Dogan, B. (2006), "Comaparative Study of Hydrogen Storage Efficiency and Thermal Effects of Metal Hydrides vs. Carbon Materials", *WHEC*, Vol. 16, hal. 13-16.
- Sang, S. Liu, Z. Tian, P. Liu, Z. Qu, L. Zhang, Y. (2006), "Synthesis of Small Crystals Zeolite NaY", *Materials Letters*, Vol. 60, hal. 1131-1133.
- Saputra, R., 2006, *Pemanfaatan Zeolit Sintetis sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Industri*, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.
- Saragih, Sehat Abdi. (2008), *Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif dari Batubara Riau sebagai Adsorben*, Tesis FT UI, Depok.
- Sekretariat Panitia Teknis Sumber Energi (PTE). (2007), *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (BP-PEN) 2005-2025*, Keputusan Menteri ESDM No. 0983 K/16/MEM/2004, Jakarta.
- Sevilla, M. Fuertes, A.B. Mokaya, R. (2011), "Preparation and Hydrogen Storage Capacity of Highly Porous Activated Carbon Materials Derived from Polythiophene", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, hal. 15658-15663.
- Sevilla, Marta. Alam, Nurul. Mokaya, Robert. (2010), "Enhancement of Hydrogen Storage Capacity of Zeolite-Templated Carbons by Chemical Activation", *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 114, hal. 11314 – 11319.
- Shakhashiri. Prof (2008), *Carbondioxide*, [www.scifun.org](http://www.scifun.org) (diakses pada 15 Juni 2014).
- Shasikala, K. (2012), *Hydrogen Storage Materials-Chapter 15*, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, hal. 607-637.
- Sheppard, D.A. dan Buckley, C.E. (2008), "Hydrogen Adsorption on Porous Silica", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, hal. 1688-1692.
- Sing, S.K.W. and Gregg, S. J., (1982), "Adsorption, Surface Area and Porosity", Second Edition, Academic Press, New York, hal 321
- Sivakumar, R. Ramaprabhu, S. Rao, K.V.S Rama. Anton, H. Schmidt, P.C. (1999), "Hydrogen Absorption Characteristics in The  $Tb_{1-x}Zr_xFe_3$  ( $x=0.1$ ),

0.2, 0.3) System”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 285, hal. 143-149.

- Sivakumar, R. Ramaprabhu, S. Rao, K.V.S Rama. Anton, H. Schmidt, P.C. (2000), “Kinetics of Hydrogen Absorption and Thermodynamics of Dissolved Hydrogen in  $Tb_{1-x}Zr_xFe_3$  System”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 25, hal. 463-472.
- Smart, Lesley A. dan Moore, Elaine A. (1993), *Solid State Chemistry: An Introduction, First Edition*, Chapman & Hall University and Profesional Division, London.
- Smart, Lesley A. dan Moore, Elaine A. (2005), *Solid State Chemistry: An Introduction, Third Edition*, CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Song C. (2003), “Overview of Hydrogen Production Options for Hydrogen Energy Development, Fuel-Cell Fuel Processing and Mitigation of CO<sub>2</sub> Emissions”, *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Pittsburgh Coal Conference*, Hydrogen from Coal, Pittsburgh, USA, hal. 3-40.
- Song, Lifang. Wang, Shuang. Jiao, Chengli. Si, Xiaoliang. Li, Zhibao. Liu, Shuang. Liu, Shusheng. Jiang, Chunhong. Li, Fen. Zhang, Jian. Sun, Lixian. Xu, Fen. Huang, Fenglei. (2012), “Thermodynamics Study of Hydrogen Storage Materials”, *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 46, hal. 86-93.
- Ströbel, R. Garche, J. Moseley, P.T. Jörisen, L. Wolf, G. (2006), “Review: Hydrogen Storage by Carbon Materials”, *Journal of Power Sources*, Vol. 159, hal. 781-801.
- Su, F. Zhao, X.S. Lv, Lu. Zhou, Z. (2004), “Synthesis and Characterization of Microporous Carbons Templated by Ammonium-form Zeolite Y”, *Journal of Carbon*, Vol. 42, hal. 2821-2831.
- Sunardi (2007), *116 Unsur Kimia, Deskripsi, dan Pemanfaatannya*, Yrama Widya, Bandung.
- Suwandi, A.C. Indraswati, N. Ismadji, S. (2011), “Modifikasi Kaolin dengan menggunakan Surfaktan Alami dari Buah Lerak untuk Menghilangkan Zat Warna”, *Prosiding Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia*.
- Takagi, H. Hatori, H. Soneda, Y. Yoshizawa, N. dan Yamada, Y. (2004), “Adsorptive Hydrogen Storage in Carbon and Porous Materials”, *Material Science Engineering*, Vol. 108, hal. 143-147.
- Tedds, Steven. Walton, Allan. Broom, D.P. dan Book, David. (2011), “Characterisation of Porous Hydrogen Storage Materials: Carbon, Zeolite, MOFs, and PIMs”, *Faraday Discussion*, Vol. 151, hal. 75-94.

- Texier-Mandoki, N. (2004), "Hydrogen Storage in Activated Carbon Materials: Role of The Nanporous Texture", *Carbon*, Vol 42, hal. 2735-2777.
- Thomas, K. Mark. (2007), "Hydrogen Adsorption and Storage on Porous Materials", *Catalysis Today*, Vol. 120, hal. 389-398.
- Ting, C.C. Wu, H.Y. Vetrivel, S. Saikia, D. Pan, Y.C. Fey, G.T.K. Kao, H.M. (2010), "A One-pot Route to Synthesize Highly Ordered Mesoporous Carbons and Silicas Through Organic-inorganic Self-assembly of Triblock Copolymer, Sucrose and Silica", *Microporous and Mesoporous Mater*, Vol. 128, hal. 1-11.
- Turnbull, M. S. (2010), *Hydrogen Storage in Zeolites: Activation of The Pore Space Through Incorporation of Guest Materials*, Tesis Ph.D., University of Birmingham, Birmingham.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (2004), *World Population to 2300*, United Nations, New York.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2013), *The Emissions Gas Report 2013*, UNEP, Nairobi.
- US Department of Energy (2009), Targets of Onboard Hydrogen Storage Systems fo Light-Duty Vehicles, Revision 4.0, hal. 1-22.
- Valdés, M.G. Pérez-Cordoves, A.I. dan Díaz-García, M.E. (2006), "Zeolites and Zeolite-Based Materials in Analytical Chemistry", *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 25, hal. 24-30.
- Viswanathan, B. Neel. P. Indra, Varadarajan, T.K. (2009), "Methods of Activation and Spesific Applications of Carbon Materials", E-book of National Center for Catalysis Research Department of Chemistry.
- Vitillo, J.G. Ricchiardi, G. Spoto, G. Zecchina, A. (2005), "Theoretical Maximal Storage of Hydrogen in Zeolitic Frameworks. Phys Chem, Vol. 7, hal. 3948-3954.
- Wang, Huanlei, Gao, Qiuming, Hu, Juan, Chen, Zhi, (2009), "Hydrogen storage properties of N-doped microporous carbon", *Journal of Physics Chemistry*, Vol. 113, hal 21883 – 21888.
- Weitkamp, J. (2009), "Zeolites", Elsevier, Stuttgart.
- Weitkamp, J. Fritz, M. dan Ernst, S. (1995), "Zeolites as Media for Hydrogen Storage", *International Journal of Hydrogen Storage*, Vol. 20, hal. 967-970.
- Widiastuti, N. Wu, H. Ang, H.M. dan Zhang, D. (2009). "Removal of Ammonium from Greywater using natural zeolite", *J. Desalination*, Vol. 218, hal. 271-280.

- World Trade Organization (WTO) dan United Nations Environment Programme (UNEP). (2009), *Trade and Climate Change*, WTO Secretariat, Switzerland.
- Xia, Yongde. Mokaya, Robert. Grant, David M. Walker, Gavin S. (2011), "A Simplified Synthesis of N-Doped Zeolite-Templated Carbons, the Control of the Level of Zeolite-Like Ordering and Its Effect on Hydrogen Storage Properties", *Carbon*, Vol. 49, hal. 844-853.
- Xia, Yongde. Walker, G.S. Grant, D.M. dan Mokaya, R. (2009), "Hydrogen Storage in High Surface Area Carbons: Experimental Demonstration of the Effects of Nitrogen Doping", *Journal of American Chemical Society*, Vol. 131, hal. 16493-16499.
- Xia, Yongde. Yang, Zhuxian. Gou, Xinglong. dan Zhu, Yanqiu. (2013), "A Simple Method for the Production of Highly Ordered Porous Carbon Materials with Increased Hydrogen Uptake Capacities", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, hal. 5039-5052.
- Xiao, Bo. dan Yuan, Qingchun. (2009), "Nanoporous Metal Organic Framework Materials for Hydrogen Storage", *Particuology*, Vol. 7, hal. 129-140.
- Xu, W.C. Takahashi, K. Matsuo, Y. Hattori, Y. Kumagai, M. Ishiyama, S. Kaneko, K. Iijima, S. (2007), "Investigation of Hydrogen Storage Capacity of Various Carbon Materials", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, hal. 2504-2512.
- Yang, Jun. Sudik, Andrea. Wolverton, Christopher. Dan Siegel, D.J. (2010), "High Capacity Hydrogen Storage Materials : Attributes for Automotive Applications and Techniques for material Discovery", *Chemical Society Reviews*, Vol. 39, hal. 656-675.
- Yang, Seung Jae. Jung, Haesol, Kim, Taecheon, Park, Chong Rae. (2012), "Recent Advances in Hydrogen Storage Technologies Based on Nanoporous Carbon Materials", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 22, hal. 631-638.
- Yang, Zhuxian. Xia, Yongde. Mokaya, Robert. (2007), "Enhanced Hydrogen Storage Capacity of High Surface Area Zeolite Like Carbon Material", *Journal of American Chemical Society*, Vol. 129, hal. 1673-1679.
- Yang, Zhuxian. Xia, Yongde. Sun, Xuezhong. dan Mokaya, Robert. (2006), "Preparation and Hydrogen Storage Properties of Zeolite-Templated Carbon Materials Nanocast via Chemical Vapor Deposition : Effect of the Zeolite Templated and Nitrogen Doping", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, hal. 18424-18431.
- Zamora, B. Al-Hajjaj, A.A. Shah, A.A. Bavykin, D.V. Reguera, E. (2013), "Kinetic and Thermodynamic Studies of Hydrogen Adsorption on



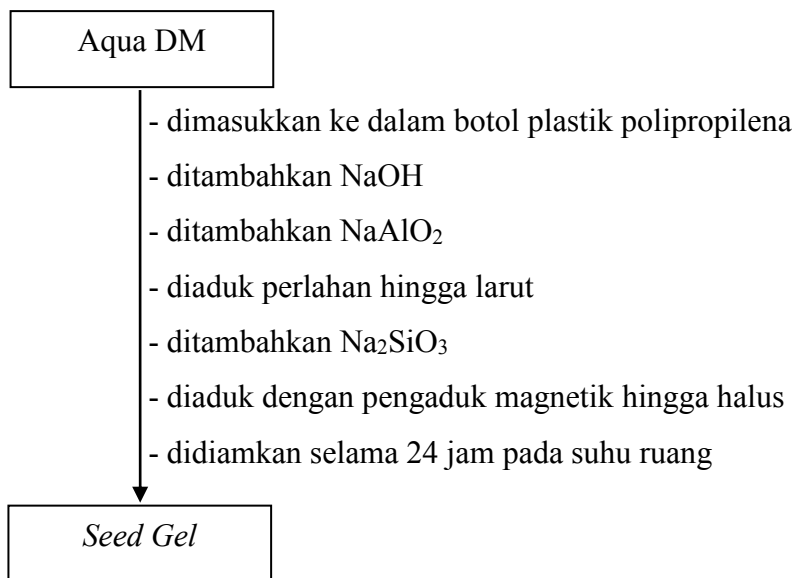
- Titanate Nanotubes Decorated with a Prussian Blue Analogue”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, hal 6406-6416.
- Zhao, W. Fierro, V. Fernández-Huerta, N. Izquierdo, M.T. Celzard, A. (2013), “Hydrogen Uptake of High Surface Area-Activated Carbons Doped with Nitrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. xxx, hal. 1-8.
- Zhao, W. Fierro, V. Zlotea, C. Aylon, E. Izquierdo, M.T. Latroche, M. Celzard, A. (2011), “Optimization of Activated Carbons for Hydrogen Storage”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, hal. 11746-11751.
- Zhao, X.B. Xiao, B. Fletcher, A.J. dan Thomas, K.M. (2005), “Hydrogen Adsorption on Functionalized Nanoporous Activated Carbons”, *Journal of Physics Chemistry B*, Vol. 109, hal 8880 – 8888.
- Zhou, Li. (2005), “Progress and Problems in Hydrogen Storage Methods”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 9, hal. 395-408.
- Zubizarreta, L. Arenillas A. Pis J. J. (2009), “Carbon Materials for H<sub>2</sub> Storage”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, hal. 4575-4581.
- Zukal, A. Arian, C.O. Delgado, M.R. Nachtigall, P. Pulido, A. Mayerová, J. Čejka, J. (2011), “Combined Volumetric, Infrared Spectroscopic and Theoretical Investigation of CO<sub>2</sub> Adsorption on Na-A Zeolite”, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 146, hal. 95-105.
- Züttel, A. Remhol, Arndt. Borgschulte, Andreas. Friedrichs, Oliver. (2010), “Review Hydrogen: The Future Energy Carrier”, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, Vol. 369, hal. 3329-3342.
- Züttel, Andreas. (2003), “Materials for Hydrogen Storage”, *Materials Today*, September, ISSN : 13697021 Elsevier, Ltd.
- Zweig, R.M. (1994), “Hydrogen Energy Progress XI, Proceedings of The 10<sup>Th</sup> World Hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, Floride, USA. 20-24 June 1994, hal. 151.

## LAMPIRAN A

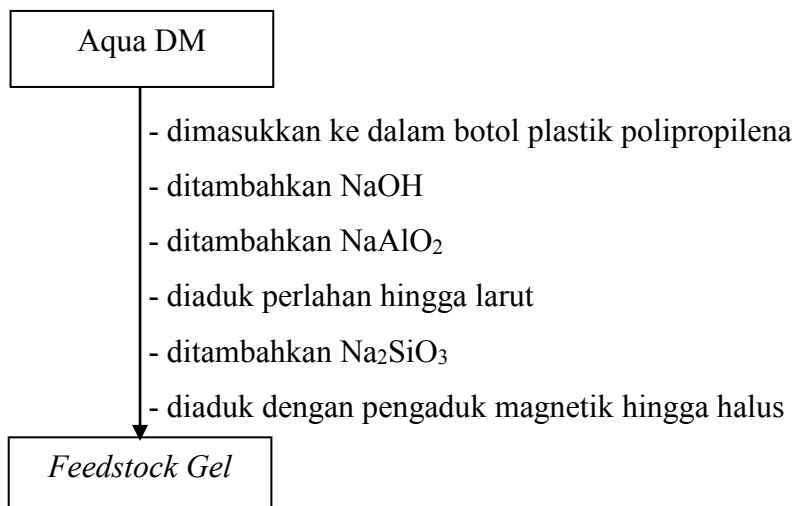
### SKEMA KERJA

#### 1. Sintesis Zeolit-Y

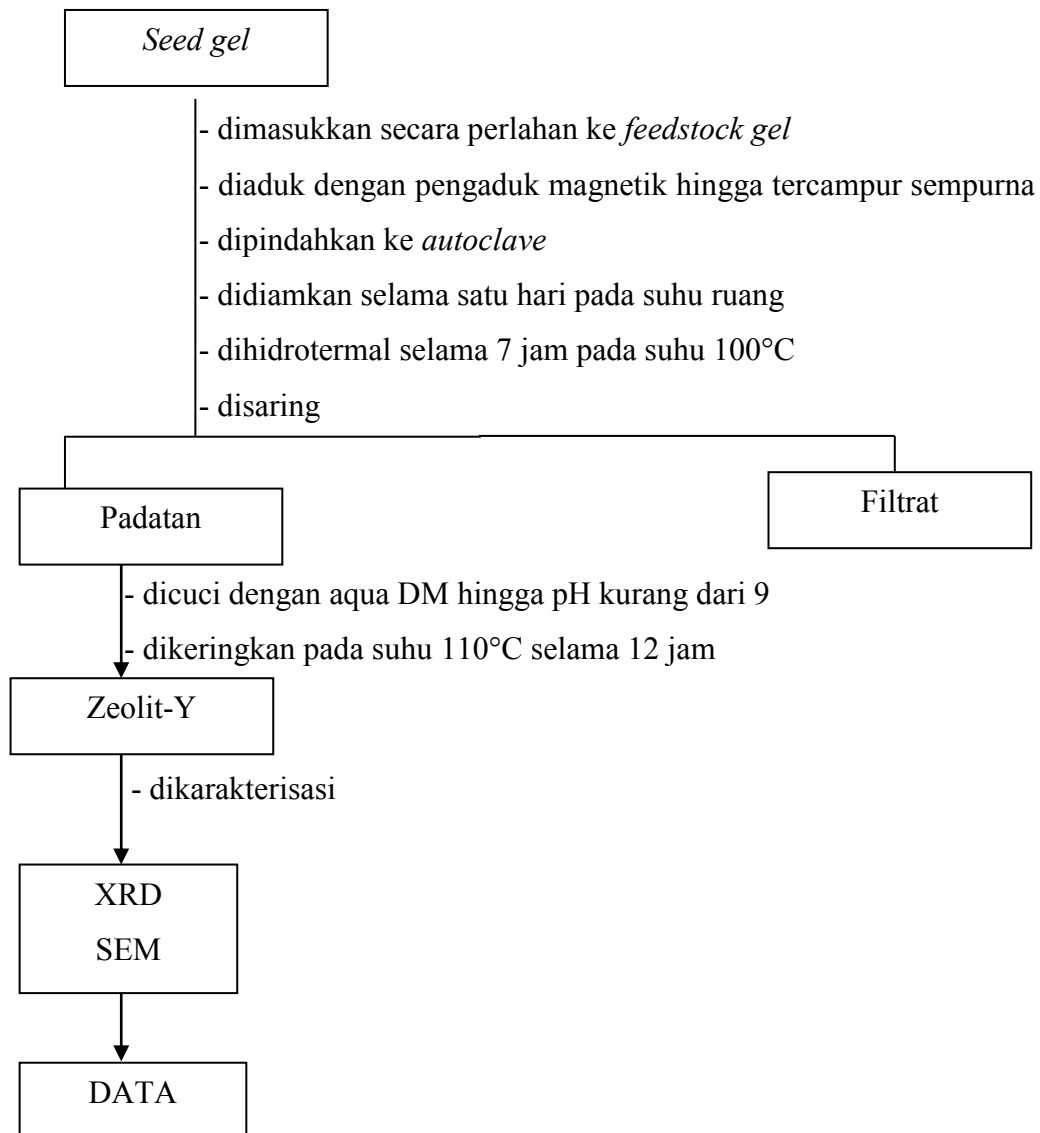
##### A. Pembuatan *Seed Gel*



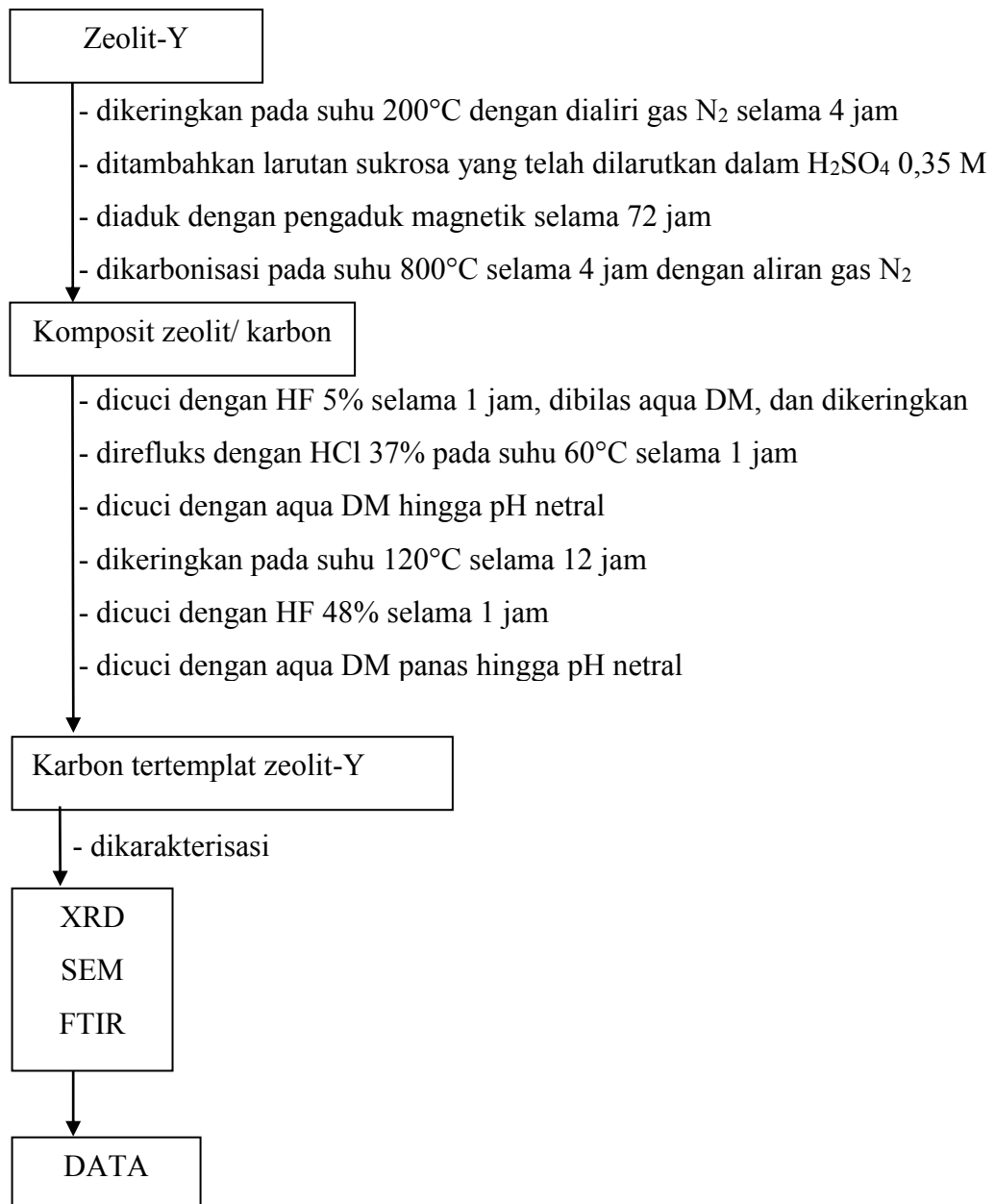
##### B. Pembuatan *Feed Gel*



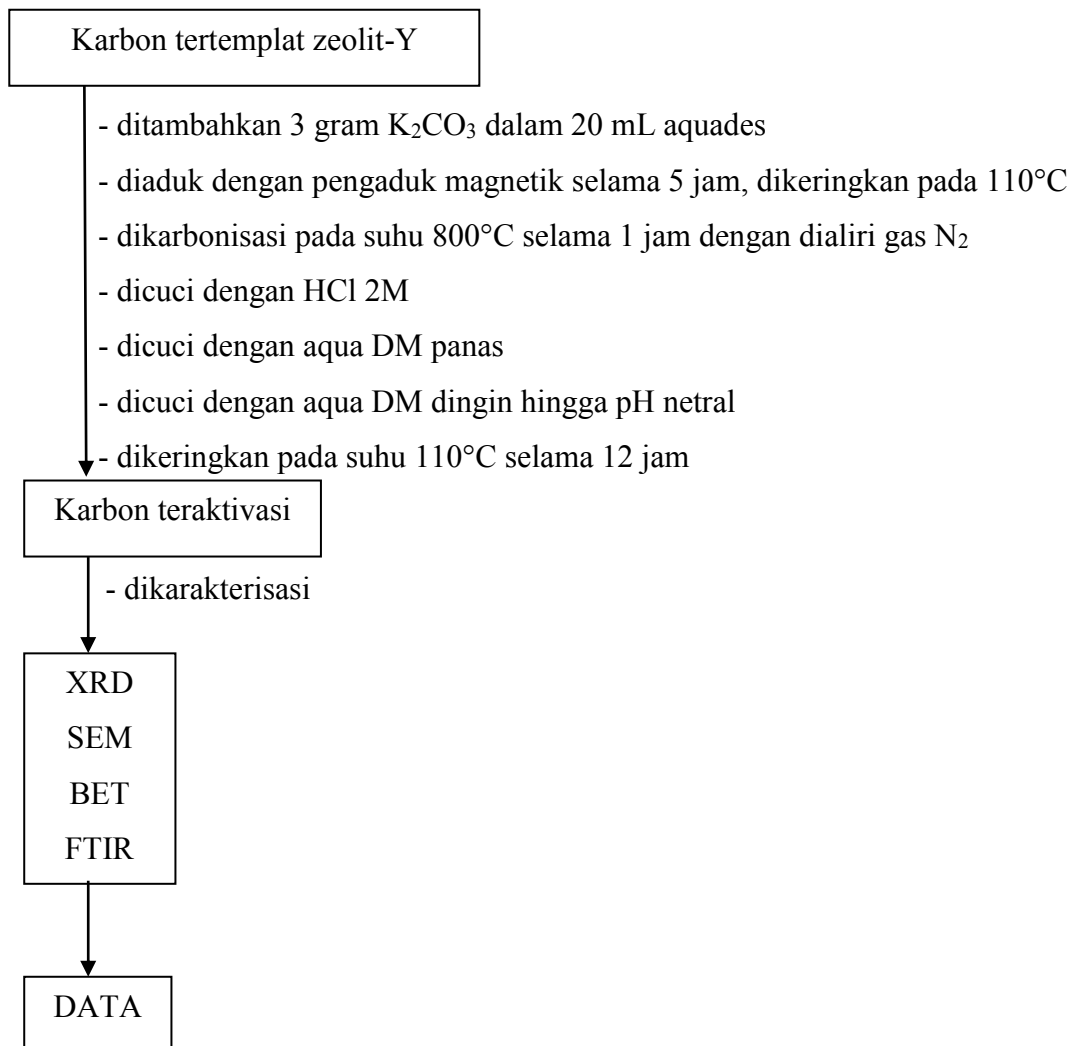
### C. Pembuatan Overall Gel



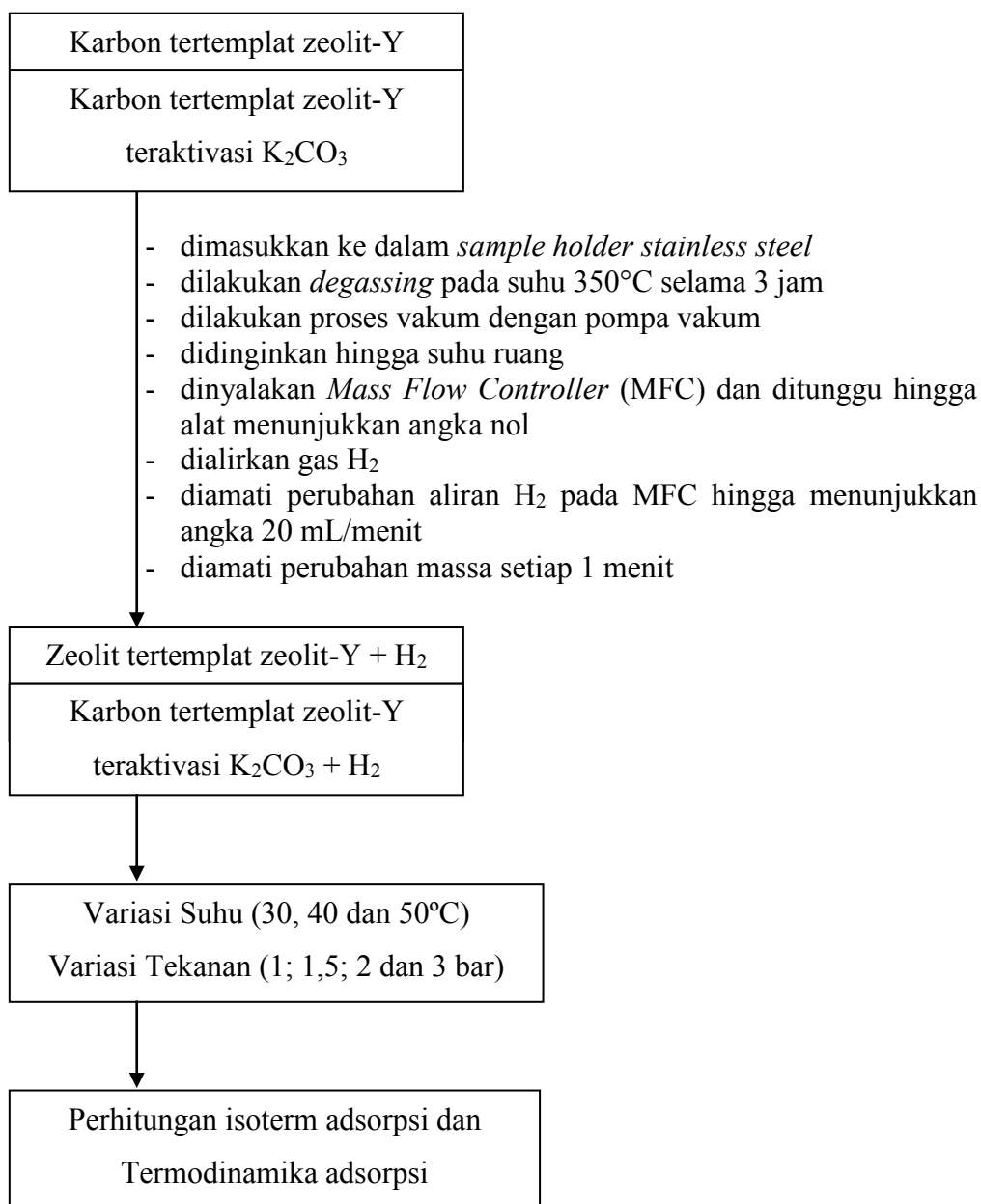
## 2. Sintesis karbon tertemplat zeolit-Y



### 3. Aktivasi karbon teremplat zeolit dengan $K_2CO_3$



#### 4. Pengujian Kapasitas Penyimpanan H<sub>2</sub>



## LAMPIRAN B

### PERHITUNGAN FORMULA ZEOLIT-NaY

#### 1. Prosentase komposisi bahan

- a) NaOH pelet = 99% (Mr = 40 g/mol)
- b) Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 35,5%
  - Perbandingan Na<sub>2</sub>O : SiO<sub>2</sub> = 1 : 1, Prosentase = 21–50% → rata-rata = 35,5%  
sehingga Na<sub>2</sub>O : SiO<sub>2</sub> = 17,75% : 17,75%
  - SiO<sub>2</sub> = 16 – 17% → rata-rata = 16,5% (Mr = 60 g/mol)
  - H<sub>2</sub>O = 33 – 63% → rata-rata = 48% (Mr = 18 g/mol)
- c) NaAlO<sub>2</sub>
  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 50 – 56% → rata-rata = 53% (Mr = 101,96 g/mol)
  - Na<sub>2</sub>O = 40 – 45% → rata-rata = 42,5% (Mr = 62 g/mol)
  - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,05%

#### 2. Pembuatan *Seed Gel*

Perbandingan mol bahan untuk pembuatan seed gel adalah

$$\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : \text{H}_2\text{O} = 10,67 : 1 : 10 : 180$$

- a) Massa NaAlO<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}\text{Massa Al}_2\text{O}_3 &= n \times \text{Mr} \\ &= 1 \text{ mol} \times 101,96 \text{ g/mol} \\ &= 101,96 \text{ g}\end{aligned}$$

Prosentase Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam NaAlO<sub>2</sub> adalah 53%, sehingga massa NaAlO<sub>2</sub> yang harus ditambahkan adalah:

$$\begin{aligned}\text{Massa NaAlO}_2 &= \frac{\text{massa Al}_2\text{O}_3}{53\%} \\ &= \frac{101,96 \text{ g}}{53\%} \\ &= 192,3773 \text{ g}\end{aligned}$$

- b) Masaa Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

$$\begin{aligned}\text{Massa SiO}_2 &= n \times \text{Mr} \\ &= 10 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} \\ &= 600 \text{ g}\end{aligned}$$

Prosentase  $\text{SiO}_2$  dalam  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 17,75\% + 16,5\% = 34,25\%$ , sehingga

$$\begin{aligned}\text{Massa Na}_2\text{SiO}_3 &= \frac{\text{massa SiO}_2}{34,25\%} \\ &= \frac{600 \text{ g}}{34,25\%} \\ &= 1751,8248 \text{ g}\end{aligned}$$

c) Massa  $\text{H}_2\text{O}$

$$\begin{aligned}\text{Massa H}_2\text{O} &= n \times \text{Mr} \\ &= 180 \text{ mol} \times 18 \text{ g/mol} \\ &= 3240 \text{ g}\end{aligned}$$

Prosentase  $\text{H}_2\text{O}$  dalam  $\text{NaSiO}_3$  adalah 48%

$$\begin{aligned}\text{Massa H}_2\text{O} &= 48\% \times \text{massa Na}_2\text{SiO}_3 \\ &= 48\% \times 1751,8248 \text{ g} \\ &= 840,8759 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa H}_2\text{O} &= 3240 \text{ g} - 840,8759 \text{ g} \\ &= 2399,1241 \text{ g}\end{aligned}$$

d) Massa  $\text{Na}_2\text{O}$

$$\text{Mol Na}_2\text{O} = 10,67 \text{ mol}$$

Dalam  $\text{NaAlO}_2$

Massa  $\text{Na}_2\text{O}$  dalam 192,3773 g  $\text{NaAlO}_2$  adalah

$$\begin{aligned}\text{Massa Na}_2\text{O} &= 42,5\% \times \text{massa NaAlO}_2 \\ &= 42,5\% \times 192,3773 \text{ g} \\ &= 81,7604 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol Na}_2\text{O} &= \frac{81,7604 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} \\ &= 1,3187 \text{ mol}\end{aligned}$$

Dalam  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

$\text{Na}_2\text{O}$  dalam 1751,8248 g  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  adalah

$$\begin{aligned}\text{Massa Na}_2\text{O} &= 17,75\% \times \text{massa Na}_2\text{SiO}_3 \\ &= 17,75\% \times 1751,8248 \text{ g} \\ &= 310,9489 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol Na}_2\text{O} &= \frac{310,9489 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} \\ &= 5,0153 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Total mol Na}_2\text{O dari NaAlO}_2 \text{ dan Na}_2\text{SiO}_3 &\text{ adalah} \\ &= 1,3187 \text{ mol} + 5,0153 \text{ mol} = 6,3340 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Maka penambahan mol Na}_2\text{O yang dibutuhkan} &\text{ adalah :} \\ &= 10,67 \text{ mol} - 6,3340 \text{ mol} = 4,3360 \text{ mol}\end{aligned}$$



Penambahan Na<sub>2</sub>O yang kurang dilakukan melalui penambahan NaOH (ekivalen), sehingga :

$$\begin{aligned}\text{Mol NaOH yang harus ditambahkan} &= 2 \times 4,3360 \text{ mol} \\ &= 8,6720 \text{ mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa NaOH yang harus ditambahkan} &= 8,6720 \text{ mol} \times 40 \text{ g/mol} \\ &= 346,8800 \text{ g}\end{aligned}$$

Karena keterbatasan volume reaktor hidrotermal, maka massa dan volume yang diperoleh dalam pembuatan *seed gel* dibagi 100. Sehingga massa bahan yang digunakan untuk pembuatan *seed gel* adalah :

$$\begin{aligned}\text{NaAlO}_2 &= 192,3773 \text{ g} : 100 = 1,9238 \text{ g} \\ \text{NaSiO}_3 &= 1751,8248 \text{ g} : 100 = 17,5182 \text{ g} \\ \text{H}_2\text{O} &= 2399,1241 \text{ g} : 100 = 23,9912 \text{ g} \\ \text{NaOH} &= 346,8800 \text{ g} : 100 = \underline{3,4688 \text{ g}} + \\ \text{Massa total teoritis} &46,035 \text{ g}\end{aligned}$$

Untuk membuat *overall gel*, massa *seed gel* yang ditambahkan ke dalam *feedstock gel* adalah 16,5 g, sehingga komposisi mol masing-masing bahan dalam 16,5 g *seed gel* adalah :

Bahan	Mol	Massa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	= 0,01 mol x 101,96 g/mol = 1,0196 g
SiO <sub>2</sub>	0,1	= 0,1 mol x 60 g/mol = 6,0000 g
H <sub>2</sub> O	1,8	= 1,8 mol x 18 g/mol = 32,4000 g
Na <sub>2</sub> O	0,1067	= 0,1067 mol x 62 g/mol = 6,6154 g

Maka mol komponen dalam 16,5 g *seed gel* adalah

Mol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= (16,5 g / 46,035 g) x 0,01 mol	= 0,00358 mol
Mol SiO <sub>2</sub>	= (16,5 g / 46,035 g) x 0,1 mol	= 0,03584 mol
Mol H <sub>2</sub> O	= (16,5 g / 46,035 g) x 0,1067 mol	= 0,64516 mol
Mol Na <sub>2</sub> O	= (16,5 g / 46,035 g) x 0,1067 mol	= 0,03824 mol

### 3. Pembuatan *Feedstock Gel*

Perbandingan *feedstock gel* : *seed gel* yang harus ditambahkan untuk membentuk overall gel adalah 18 : 1

Rasio perbandingan SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada

$$\begin{aligned}\text{feedstock gel} : \text{seed gel} &= (0,06452 + 0,6452) : (0,0036 + 0,0358) \\ &= 0,7097 : 0,0394 \\ &= 18 : 1\end{aligned}$$

Spesi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mol)	SiO <sub>2</sub> (mol)	H <sub>2</sub> O (mol)
<i>Seed gel</i>	0,00358	0,03584	0,64516
<i>Feedstock gel</i>	0,06444	0,64512	11,61288
Rasio terhadap Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	10	180

a) Massa NaAlO<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}\text{Massa Al}_2\text{O}_3 &= n \times \text{Mr} \\ &= 0,06444 \text{ mol} \times 101,96 \text{ g/mol} \\ &= 6,5703 \text{ g}\end{aligned}$$

Prosentase Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam NaAlO<sub>2</sub> adalah 53%, sehingga massa NaAlO<sub>2</sub> yang harus ditambahkan adalah:

$$\begin{aligned}\text{Massa NaAlO}_2 &= \frac{\text{massa Al}_2\text{O}_3}{53\%} \\ &= \frac{6,5703 \text{ g}}{53\%} \\ &= 12,3968 \text{ g}\end{aligned}$$

b) Massa Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

$$\begin{aligned}\text{Massa SiO}_2 &= n \times \text{Mr} \\ &= 0,64512 \text{ mol} \times 60 \text{ g/mol} \\ &= 38,7072 \text{ g}\end{aligned}$$

Prosentase SiO<sub>2</sub> dalam Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> adalah 34,25%, sehingga massa Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang harus ditambahkan adalah:

$$\begin{aligned}\text{Massa Na}_2\text{SiO}_3 &= \frac{\text{massa SiO}_2}{34,25\%} \\ &= \frac{38,7072 \text{ g}}{34,25\%} \\ &= 113,0137 \text{ g}\end{aligned}$$

c) Massa H<sub>2</sub>O

$$\begin{aligned}\text{Massa H}_2\text{O} &= n \times \text{Mr} \\ &= 11,61288 \text{ mol} \times 18 \text{ g/mol} \\ &= 209,0318 \text{ g}\end{aligned}$$

Prosentase H<sub>2</sub>O dalam Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> adalah 48%, sehingga massa H<sub>2</sub>O yang harus ditambahkan adalah:

$$\begin{aligned}\text{Massa H}_2\text{O} &= 48\% \times \text{massa Na}_2\text{SiO}_3 \\ &= 48\% \times 113,0137 \text{ g} \\ &= 54,2466 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa H}_2\text{O} &= 209,0318 \text{ g} - 54,2466 \text{ g} \\ &= 154,7852 \text{ g}\end{aligned}$$

d) Massa NaOH

Massa Na<sub>2</sub>O dalam 12,3968 g NaAlO<sub>2</sub> adalah

$$\begin{aligned}\text{Massa Na}_2\text{O} &= 42,5\% \times \text{massa NaAlO}_2 \\ &= 42,5\% \times 12,3968 \text{ g} \\ &= 5,2686 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol Na}_2\text{O} &= \frac{5,2686 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} \\ &= 0,08498 \text{ mol}\end{aligned}$$

Massa Na<sub>2</sub>O dalam 113,0137 gr NaSiO<sub>3</sub> adalah

$$\begin{aligned}\text{Massa Na}_2\text{O} &= 17,75\% \times \text{massa NaSiO}_3 \\ &= 17,75\% \times 113,0137 \text{ g} \\ &= 20,0599 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol Na}_2\text{O} &= \frac{20,0599 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} \\ &= 0,32355 \text{ mol}\end{aligned}$$

Total mol Na<sub>2</sub>O dari NaAlO<sub>2</sub> dan NaSiO<sub>3</sub> adalah

$$= 0,08498 \text{ mol} + 0,32355 \text{ mol} = 0,40853 \text{ mol}$$

Rasio Na<sub>2</sub>O : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,40853 : 0,06444

$$= 6,3397$$

Karena rasio Na<sub>2</sub>O 6,3397 lebih besar dari perbandingan 4,30 maka jumlah NaOH yang harus ditambahkan adalah 0,1 gram

Sehingga massa zat yang harus digunakan dalam pembuatan *feedstock gel* dan *seed gel* adalah :

Spesi	NaAlO <sub>2</sub> (g)	NaSiO <sub>3</sub> (g)	H <sub>2</sub> O (g)	NaOH (g)
<i>Seed gel</i>	1,9238	17,5182	23,9912	3,4688
<i>Feedstock gel</i>	12,3968	113,0137	154,7852	0,1

## LAMPIRAN C

### PERHITUNGAN MOLARITAS AKTIVATOR K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

#### 1. Rasio K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ Karbon = 1,5

Jumlah karbon yang digunakan sebanyak 2 gram, maka jumlah K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang harus diambil adalah

$$\begin{aligned}\text{Massa K}_2\text{CO}_3 &= 1,5 \times 2 \text{ gr} \\ &= 3 \text{ gr}\end{aligned}$$

3 gr K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dilarutkan dalam 20 mL aquades, sehingga konsentrasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> adalah

$$\begin{aligned}M &= \frac{\text{gr K}_2\text{CO}_3}{\text{Mr}} \times \frac{1000}{20} \\ &= \frac{3}{138} \times 50 \\ &= 1,0869 \text{ M}\end{aligned}$$

## LAMPIRAN D

### PERHITUNGAN PENGECERAN LARUTAN

#### 1. Perhitungan pengenceran HCl 2 M

Setelah proses aktivasi, karbon tertemplat zeolit kemudian dicuci dengan menggunakan larutan HCl 2 M. Larutan HCl 2M dibuat dengan cara mengencerkan larutan HCl 37% ke dalam labu ukur 100 mL, dengan perhitungan :

Konsentrasi HCl 37% adalah

$$\begin{aligned} M &= \frac{1000 \times \rho \times \%}{M_r \times 100} \\ &= \frac{1000 \times 1,19 \times 37}{36,5 \times 100} \\ &= 12,06 \text{ M} \end{aligned}$$

Volume awal HCl 37% yang harus diambil untuk menghasilkan 100 mL larutan HCl 2 M adalah :

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ V_1 &= \frac{M_2 \times V_2}{M_1} \\ &= \frac{2 \text{ M} \times 100 \text{ mL}}{12,06 \text{ M}} \\ &= 16,58 \text{ mL} \end{aligned}$$

#### 2. Perhitungan pengenceran H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,35 M

Pada sintesis karbon tertemplat zeolit-Y terdapat penambahan larutan sukrosa dalam H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,35 M, dimana H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tersedia pada konsentrasi 18 M. Sehingga dilakukan pengenceran untuk menghasilkan 100 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,35 M dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ V_1 &= \frac{M_2 \times V_2}{M_1} \\ &= \frac{0,35 \text{ M} \times 100 \text{ mL}}{18 \text{ M}} \\ &= 1,9444 \text{ mL} \end{aligned}$$

### 3. Perhitungan pengenceran HF 5%

Pada proses sintesis karbon teremplat zeolit-Y membutuhkan pencucian menggunakan HF 5%, dimana HF tersedia dalam konsentrasi 48%. Sehingga dilakukan pengenceran untuk menghasilkan 100 mL HF 5% dengan perhitungan sebagai berikut.

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{M_2 \times V_2}{M_1} \\ &= \frac{5\% \times 100 \text{ mL}}{48\%} \\ &= 10,4167 \text{ mL} \end{aligned}$$

## LAMPIRAN E

### DATA DAN GRAFIK XRD STANDAR ZEOLIT-Y

---

JCPDS No. 11-0672

$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{13,4} \cdot x\text{H}_2\text{O}$

(Sodium Aluminum Silicate Hydrate)

Faujasite

---

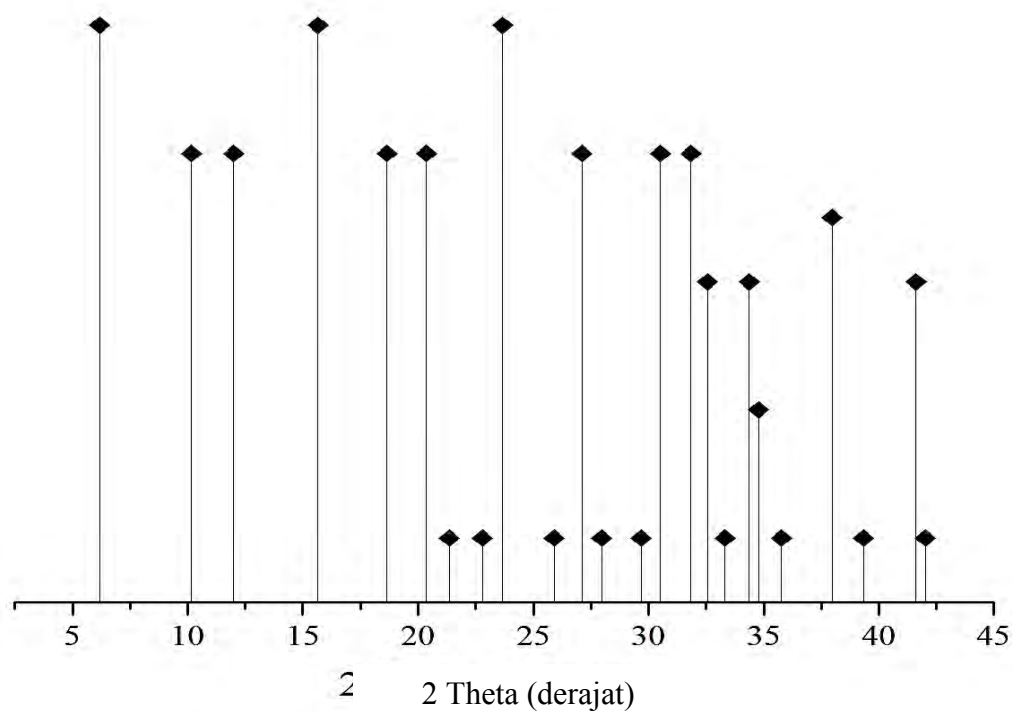
Rad :  $\text{CuK}\alpha$

$\lambda$  : 1,5418

Space Group : F d 3 m (227)

System : Cubic

---



Gambar E.1 Grafik pola XRD standar zeolit-Y ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{13,4} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) JCPDS No.11-0672

## LAMPIRAN F

### DATA DAN GRAFIK HASIL ANALISIS XRD ZEOLIT-NaY HASIL SINTESIS

X'Pert Graphics & Identify  
(searched) peak list: zeolit y

User-1  
Date: 10/7/14 16:55

Description:  
EI-0879 071014

Original scan: zeolit y  
Scan created: 1/1/90 02:38  
Description of scan:  
EI-0879 071014

Used wavelength: K-Alpha  
Wavelength (Å): 1.54056

Peak search parameter set:  
Set created: As Measured Intensities  
Peak positions defined by: 10/15/10 03:58  
Minimum peak tip width (°2Theta): Minimum of 2nd derivative  
Maximum peak tip width (°2Theta): 0.00  
Peak base width (°2Theta): 1.00  
Minimum significance: 2.00  
0.60

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
14.32267	100.00	6.16576	1234.14	44.64	0.16000	9.64
8.76659	24.32	10.08164	300.11	37.19	0.12000	2.04
7.48105	18.23	11.81978	224.95	30.92	0.16000	3.73
5.68981	57.50	15.56107	709.61	26.97	0.12000	3.17
5.06341	1.38	17.50040	17.07	26.68	0.32000	0.67
4.77388	26.27	18.57088	324.16	26.68	0.16000	4.54

Philips Analytical

Page: 1

X'Pert Graphics & Identify  
(searched) peak list: zeolit y

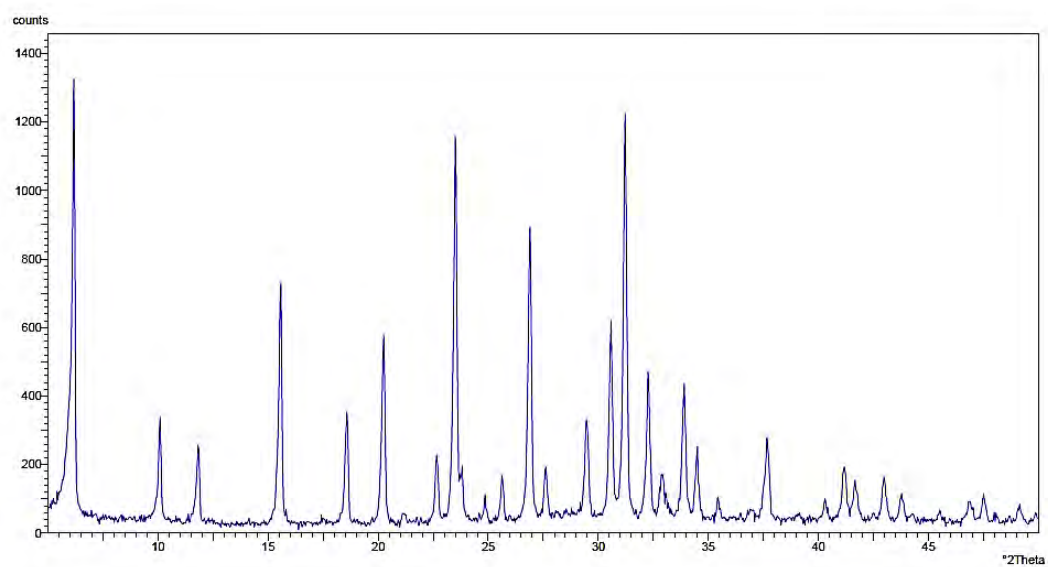
User-1  
Date: 10/7/14 16:55

d-spacing (Å)	Relative Intensity (%)	Angle (°2Theta)	Peak Height (counts)	Background (counts)	Tip Width (°2Theta)	Significance
4.38347	44.58	20.24155	550.19	26.68	0.16000	4.97
4.19212	2.41	21.17593	29.79	26.68	0.16000	1.35
3.92028	16.30	22.66308	201.15	26.68	0.16000	3.29
3.78158	92.85	23.50593	1145.93	26.68	0.16000	8.12
3.57843	6.92	24.86114	85.37	26.68	0.16000	1.30
3.47222	11.61	25.63433	143.27	26.68	0.16000	2.51
3.31292	70.66	26.88951	871.99	26.68	0.16000	7.00
3.22841	13.67	27.60720	168.70	26.68	0.16000	2.60
3.02759	24.66	29.47846	304.30	26.68	0.16000	3.13
2.92187	48.28	30.57057	595.80	26.68	0.16000	5.00
2.86293	97.15	31.21585	1198.96	26.68	0.16000	7.59
2.77161	36.09	32.27198	445.46	26.68	0.16000	3.96
2.72066	11.77	32.89326	145.22	26.68	0.16000	1.30
2.64275	33.43	33.89192	412.63	26.68	0.16000	3.68
2.59890	18.63	34.48139	229.94	26.68	0.12000	0.91
2.52982	5.85	35.45385	72.16	26.68	0.12000	3.09
2.43231	3.36	36.92537	41.44	26.68	0.24000	0.62
2.38550	20.37	37.67684	251.36	26.68	0.20000	4.29
2.30297	2.27	39.08096	28.01	26.68	0.16000	0.71
2.23654	5.93	40.29111	73.24	26.68	0.16000	1.04
2.19069	13.55	41.17237	167.18	26.68	0.16000	2.02
2.16507	8.77	41.68204	108.23	26.68	0.20000	2.34
2.10302	11.04	42.97194	136.22	26.68	0.16000	1.68
2.06631	7.14	43.77448	88.07	26.68	0.20000	1.79
1.99203	3.24	45.49615	39.99	26.68	0.16000	0.74
1.93716	5.31	46.86070	65.48	26.68	0.16000	0.86
1.91236	7.05	47.50535	87.05	26.68	0.20000	2.28
1.85355	3.47	49.11055	42.83	26.68	0.20000	1.45

Philips Analytical

Page: 2





Philips Analytical

Gambar F.1 Grafik pola XRD zeolit-NaY hasil sintesis

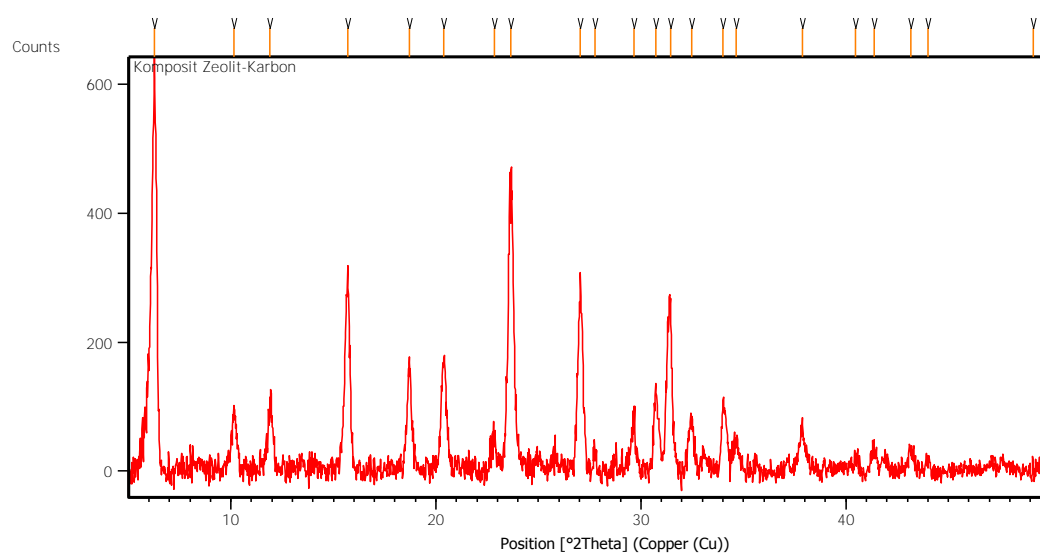
## LAMPIRAN G

### DATA DAN GRAFIK ANALISIS XRD KOMPOSIT KARBON/ZEOLIT-Y

#### Peak List:

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.2683	652.77	0.0836	14.10065	100.00
10.1546	91.45	0.2007	8.71121	14.01
11.9136	97.83	0.2676	7.42865	14.99
15.7170	290.10	0.1004	5.63850	44.44
18.7154	163.48	0.1673	4.74138	25.04
20.3944	178.04	0.2007	4.35466	27.27
22.8643	60.57	0.1673	3.88955	9.28
23.6570	456.80	0.2342	3.76099	69.98
27.0574	286.15	0.2342	3.29556	43.84
27.7690	34.79	0.2007	3.21270	5.33
29.6585	76.73	0.1673	3.01218	11.75
30.7203	137.16	0.1673	2.91046	21.01
31.4414	281.45	0.1004	2.84533	43.12
32.4809	85.56	0.2342	2.75660	13.11
34.0149	111.15	0.1673	2.63572	17.03
34.6368	44.54	0.2342	2.58981	6.82
37.8662	68.18	0.1004	2.37603	10.45
40.4729	20.18	0.2007	2.22882	3.09
41.3708	41.29	0.2676	2.18249	6.32
43.1720	42.44	0.2676	2.09552	6.50
43.9995	25.43	0.2007	2.05801	3.90
49.1313	20.10	0.0612	1.85286	3.08

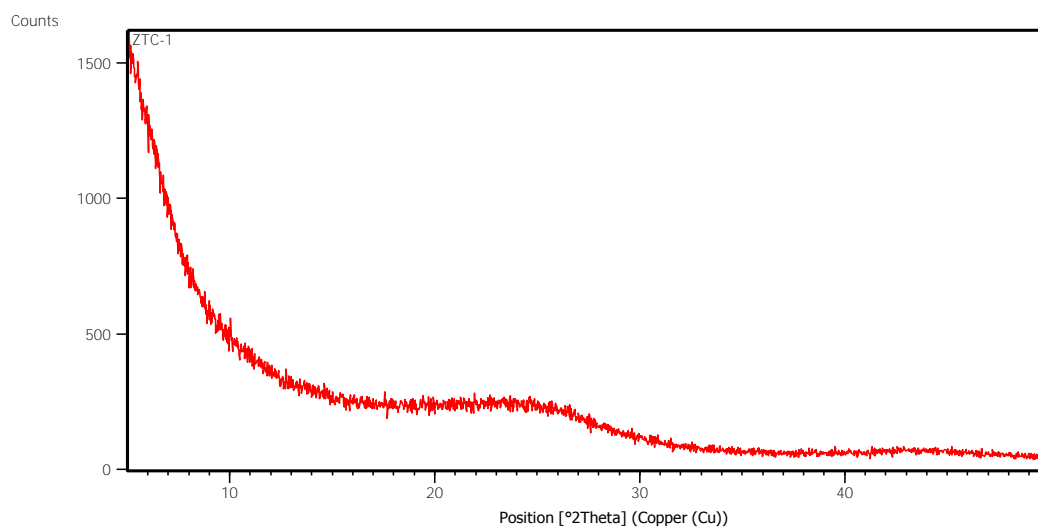
### Main Graphics :



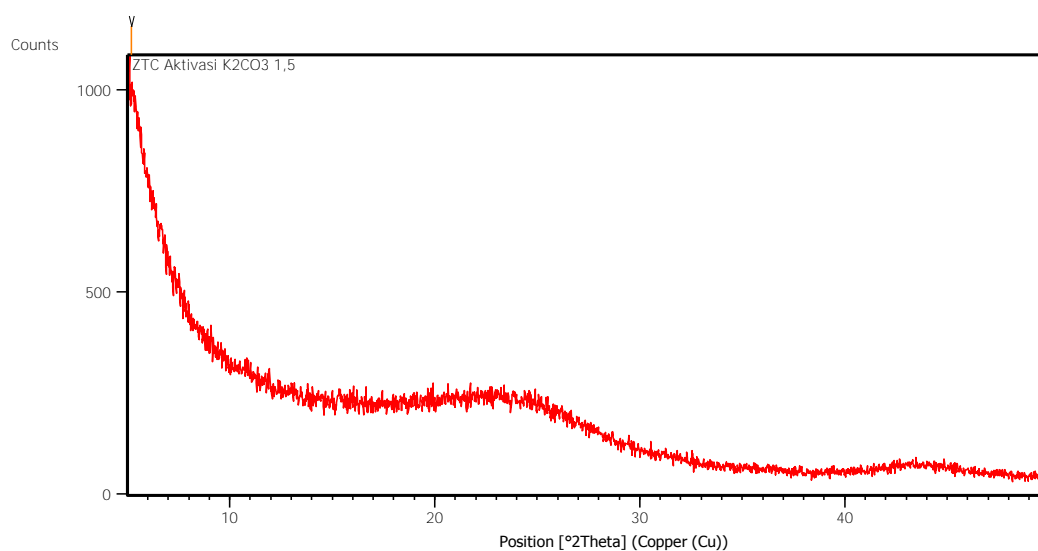
Gambar G.1 Grafik pola XRD komposit karbon/zeolit-Y

## LAMPIRAN H

### GRAFIK HASIL ANALISIS XRD KARBON TERTEMPLAT ZEOLIT-Y SEBELUM DAN SETELAH PROSES AKTIVASI



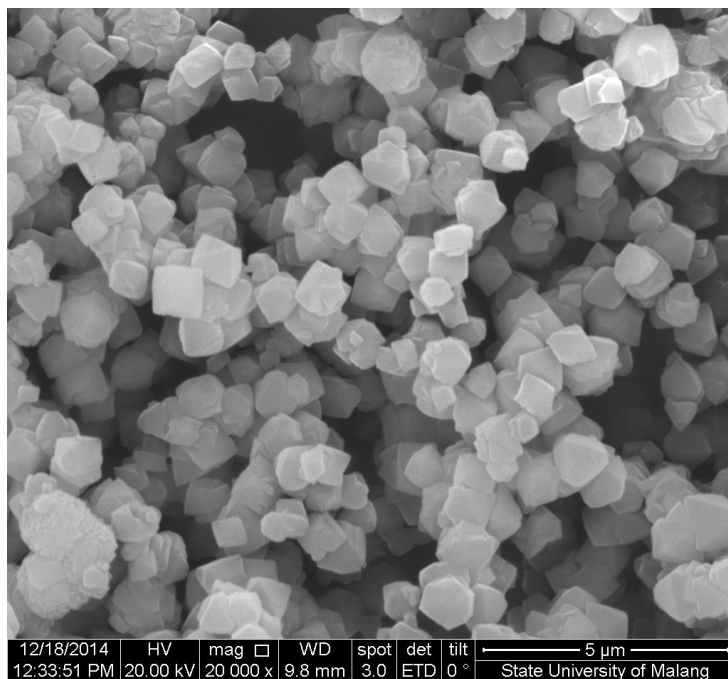
Gambar H.1 Karbon tertemplat zeolit-NaY sebelum proses aktivasi



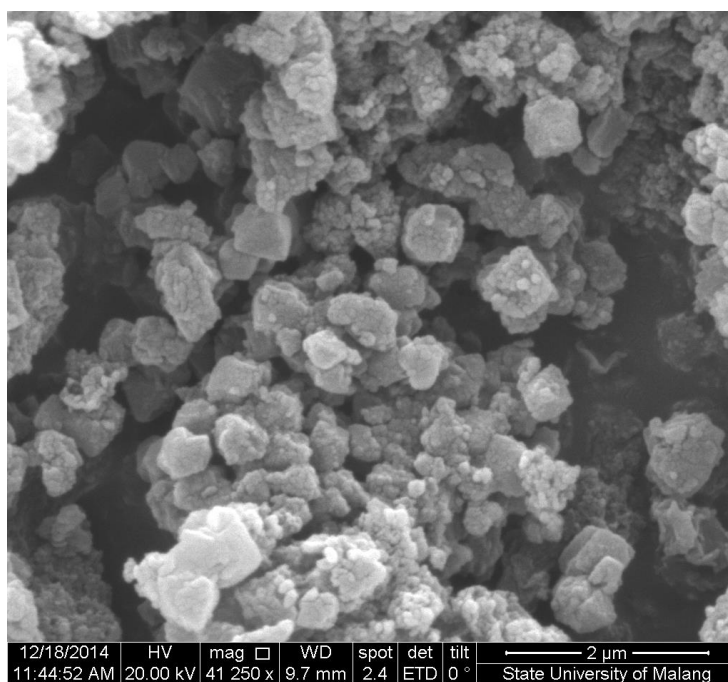
Gambar H.2 Karbon tertemplat zeolit setelah proses aktivasi dengan rasio  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (gr)/ Karbon (gr) = 1,5

## LAMPIRAN I

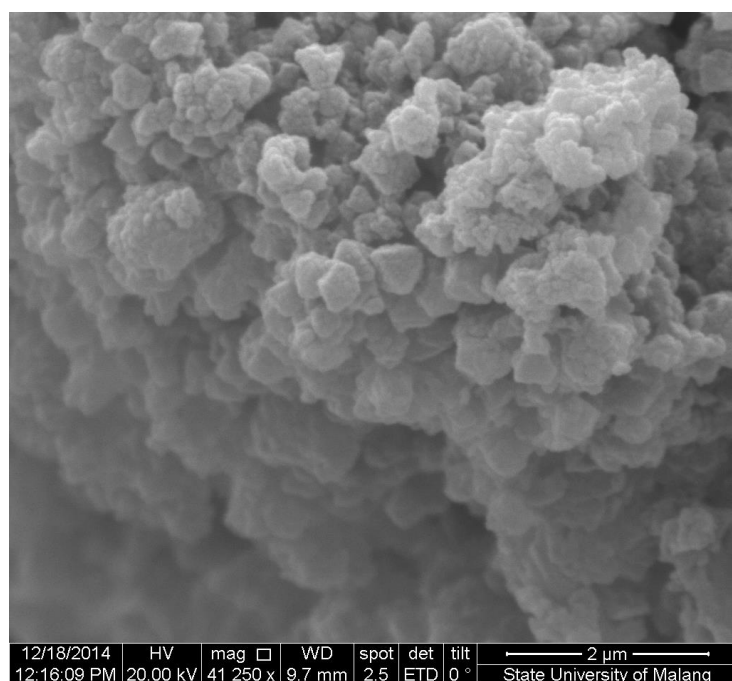
### GAMBAR HASIL ANALISA SEM



Gambar I.1 Hasil SEM zeolit-Y



Gambar I.2 Hasil SEM karbon tertemplat zeolit-Y



Gambar I.3 Hasil SEM karbon tertemplat zeolit-Y setelah proses aktivasi dengan rasio  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (gr)/ Karbon (gr) = 1,5

## LAMPIRAN J

### DATA ISOTERMAL ADSORPSI-DESORPSI N<sub>2</sub> SETELAH ADSORPSI HIDROGEN

K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Karbon teremplat zeolit-Y = 1,5

Quantachrome® ASiQwin™ - Automated Gas Sorption Data  
Acquisition and Reduction  
© 1994-2011, Quantachrome Instruments  
version 2.0

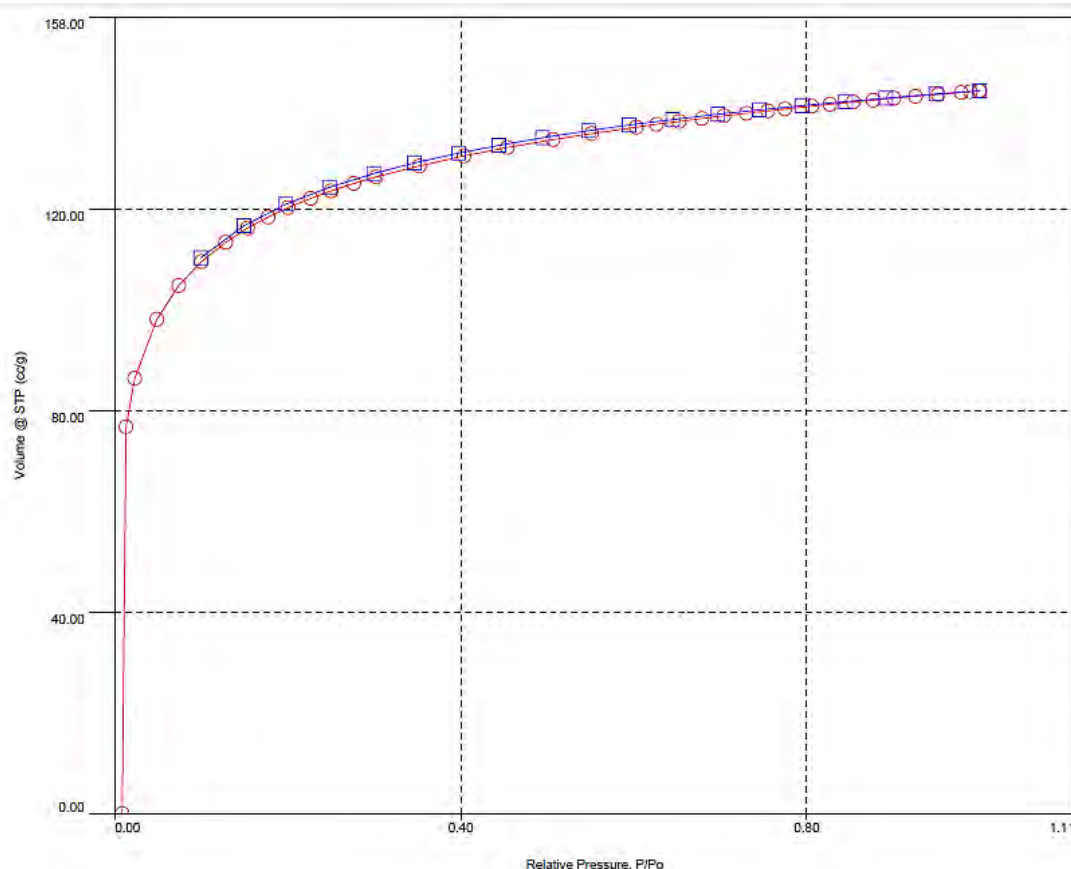


<b>Analysis</b>		<b>Report</b>	
Operator:	Lab. Energi ITS	Operator:	Lab. Energi ITS
Sample ID:	ei-1156 zeolit	Filename:	BET_iq_phisy_st.12015_01_02_16_34_09_01_EI-1156 ZTC.qps
Sample Desc:		Comment:	
Sample Weight:	0.0526 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1
Approx. Outgas Time:	41.4 hrs	Final Outgas Temp.:	300 °C
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/mmHg
Analysis Time:	36:20 hr:min	Bath temp.:	77.35 K
Analysis Mode:	Standard	Cold Zone V:	2.28048 cc
VoidVol. Mode:	He Measure		

**Extended info:** Available  
**CellType:** 9mm w/o rod  
**VoidVol Remeasure:** off  
**Warm Zone V:** 16.957 cc

**Isotherm : Linear**

Data Reduction Parameters			
<b>Adsorbate</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
Nitrogen		Temperature: 77.350K	
Molec. Wt.: 28.013		Cross Section: 16.200 Å²	Liquid Density: 0.806 g/cc







<b>Analysis</b>	Lab. Energi ITS	<b>Date:</b> 2015/01/02	<b>Report</b>	Lab. Energi ITS	<b>Date:</b> 2015/01/04
<b>Operator:</b>	ei-1156 zeolit	<b>Filename:</b>	BET_iq_phisy_st.12015_01_02_16_34_09_01_EI-1156 ZTC.qps		
<b>Sample ID:</b>		<b>Comment:</b>			
<b>Sample Desc:</b>		<b>Instrument:</b>	Autosorb iQ Station 1	<b>Extended info:</b>	Available
<b>Sample Weight:</b>	0.0526 g	<b>Final Outgas Temp.:</b>	300 °C	<b>CellType:</b>	9mm w/o rod
<b>Approx. Outgas Time:</b>	41.4 hrs	<b>Non-ideality:</b>	6.58e-05 1/mmHg	<b>VoidVol Remeasure:</b>	off
<b>Analysis gas:</b>	Nitrogen	<b>Bath temp.:</b>	77.35 K	<b>Warm Zone V:</b>	16.957 cc
<b>Analysis Time:</b>	36.20 hr:min				
<b>Analysis Mode:</b>	Standard				
<b>VoidVol. Mode:</b>	He Measure	<b>Cold Zone V:</b>	2.28048 cc		

### Multi-Point BET

#### Data Reduction Parameters Data

<b>Adsorbate</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å²	Liquid Density: 0.806 g/cc

### Multi-Point BET Data

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [ W((Po/P) - 1) ]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [ W((Po/P) - 1) ]
4.8731e-02	98.1577	4.1758e-01	2.00419e-01	120.2873	1.6673e+00
7.41127e-02	104.8539	6.1080e-01	2.26733e-01	122.1286	1.9210e+00
1.00358e-01	109.5765	8.1454e-01	2.50284e-01	123.6056	2.1610e+00
1.28271e-01	113.4222	1.0380e+00	2.76563e-01	125.0848	2.4453e+00
1.53701e-01	116.2444	1.2501e+00	3.02160e-01	126.3732	2.7414e+00
1.77389e-01	118.4235	1.4570e+00			

**BET summary**

Slope = 9.084  
Intercept = -9.881e-02  
Correlation coefficient, r = 0.997598  
C constant = -90.932

Surface Area = 387.596 m²/g



<b>Analysis</b>	Lab. Energi ITS	<b>Date:</b> 2015/01/02	<b>Report</b>	Lab. Energi ITS	<b>Date:</b> 2015/01/04
<b>Operator:</b>	ei-1156 zeolit	<b>Filename:</b>	BET_iq_phisy_st.12015_01_02_16_34_09_01_EI-1156 ZTC.qps		
<b>Sample ID:</b>		<b>Comment:</b>			
<b>Sample Desc:</b>		<b>Instrument:</b>	Autosorb iQ Station 1	<b>Extended info:</b>	Available
<b>Sample Weight:</b>	0.0526 g	<b>Final Outgas Temp.:</b>	300 °C	<b>CellType:</b>	9mm w/o rod
<b>Approx. Outgas Time:</b>	41.4 hrs	<b>Non-ideality:</b>	6.58e-05 1/mmHg	<b>VoidVol Remeasure:</b>	off
<b>Analysis gas:</b>	Nitrogen	<b>Bath temp.:</b>	77.35 K	<b>Warm Zone V:</b>	16.957 cc
<b>Analysis Time:</b>	36.20 hr:min				
<b>Analysis Mode:</b>	Standard				
<b>VoidVol. Mode:</b>	He Measure	<b>Cold Zone V:</b>	2.28048 cc		

### Total Pore Volume

#### Data Reduction Parameters Data

<b>Adsorbate</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
	Nitrogen	Temperature 77.350K	
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å²	Liquid Density: 0.806 g/cc

**Total Pore Volume summary**  
**Total Pore Volume**

Total pore volume = 2.225e-01 cc/g for  
pores smaller than -10384.4 nm (Diameter)  
at P/Po = 1.00018



**Analysis**  
Operator: Lab. Energi ITS  
Sample ID: ei-1156 zeolit  
Sample Desc:  
Sample Weight: 0.0526 g  
Approx. Outgas Time: 41.4 hrs  
Analysis gas: Nitrogen  
Analysis Time: 36.20 hr:min  
Analysis Mode: Standard  
VoidVol. Mode: He Measure

Date: 2015/01/02

Filename:  
Comment:  
Instrument:  
Final Outgas Temp.: 300 °C  
Non-ideality: 6.58e-05 1/mmHg  
Bath temp.: 77.35 K

**Report**  
Operator: Lab. Energi ITS  
BET\_iq\_phisy\_st.12015\_01\_02\_16\_34\_09\_01\_EI-1156 ZTC.qps  
Autosorb iQ Station 1  
300 °C  
6.58e-05 1/mmHg  
77.35 K

Date: 2015/01/04

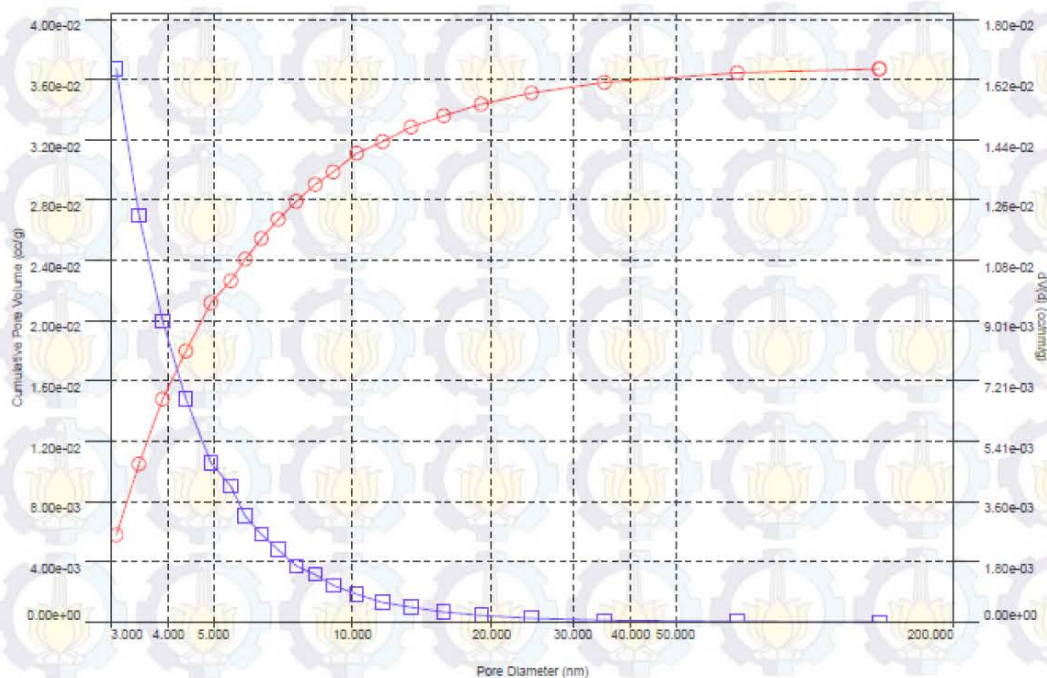
Extended info:  
CellType: Available  
9mm w/o rod

VoidVol Remeasure: off  
Warm Zone V: 16.957 cc

Cold Zone V: 2.28048 cc

### BJH method Adsorption dV(d)

t-Method BJH/DH method Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Data Reduction Parameters	
	Calc. method: de Boer	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po	
	Nitrogen	Temperature 77.350K	Liquid Density: 0.806 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å²	



### BJH adsorption summary

Surface Area = 29.743 m<sup>2</sup>/g  
Pore Volume = 0.037 cc/g  
Pore Diameter Dv(d) = 3.080 nm

# Analysis

Operator: Lab. Energi ITS  
Sample ID: ei-1156 zeolit  
Sample Desc:  
Sample Weight: 0.0526 g  
Approx. Outgas Time: 41.4 hrs  
Analysis gas: Nitrogen  
Analysis Time: 36:20 hr:min  
Analysis Mode: Standard  
VoidVol. Mode: He Measure

Date: 2015/01/02

Filename:  
Comment:  
Instrument: Autosorb iQ Station 1  
Final Outgas Temp.: 300 °C  
Non-ideality: 6.58e-05 1/mmHg  
Bath temp.: 77.35 K

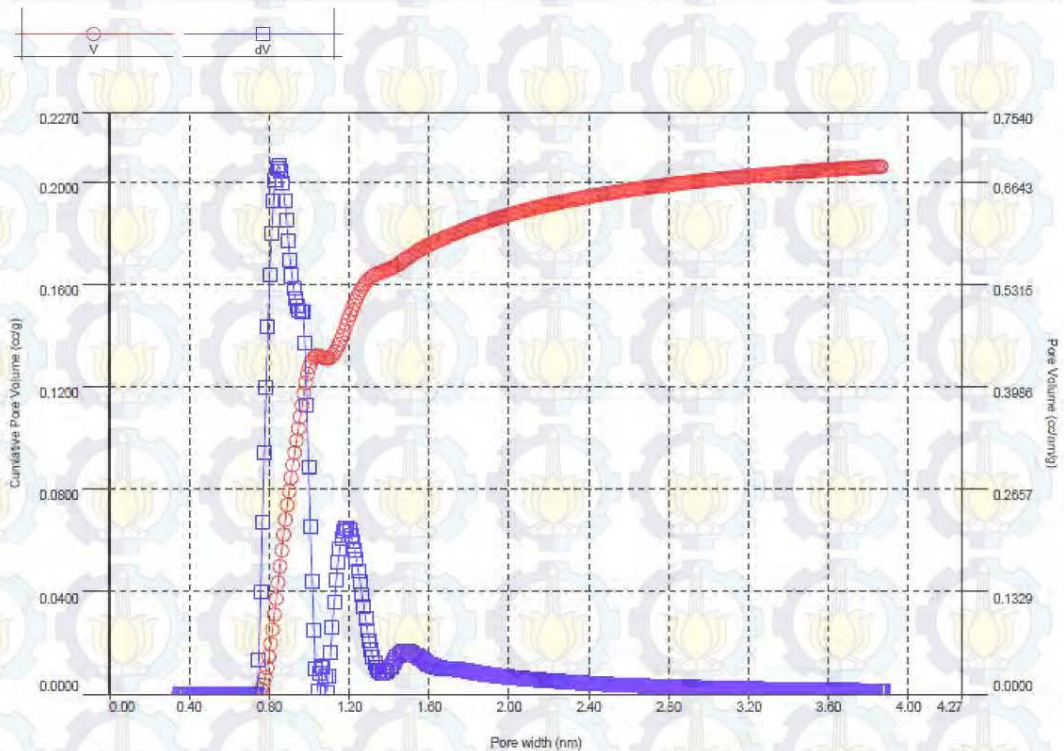
# Report

Operator: Lab. Energi ITS  
Date: 2015/01/04  
BET\_iq\_phisy\_st12015\_01\_02\_16\_34\_09\_01\_EI-1156 ZTC.qps  
Extended info: Available  
CellType: 9mm w/o rod  
VoidVol Remeasure: off  
Warm Zone V: 16.957 cc

Cold Zone V: 2.28048 cc

## SF method : Volume

Data Reduction Parameters			
SF method Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
	Tabulated data interval: 1		
	Nitrogen	Temperature: 77.350K	Liquid Density: 0.806 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å²	Magn. Suscept.: 2.000
Adsorbent	Avg. Diameter: 0.300 nm	Polarizability: 1.460 (cc/molec) x 10 <sup>-24</sup>	
	Molec. Density: 6.700 (mol/cm³) x 10 <sup>-14</sup>		
	Oxygen/Zeoilite	Surf. Atom Dens.: 13.100 (mol/cm²) x 10 <sup>-14</sup>	Polarizability: 2.500 (cc/molec) x 10 <sup>-24</sup>
	Atom Diameter: 0.276 nm	Magn. Susc.: 1.300 (cc/molec) x 10 <sup>-24</sup>	



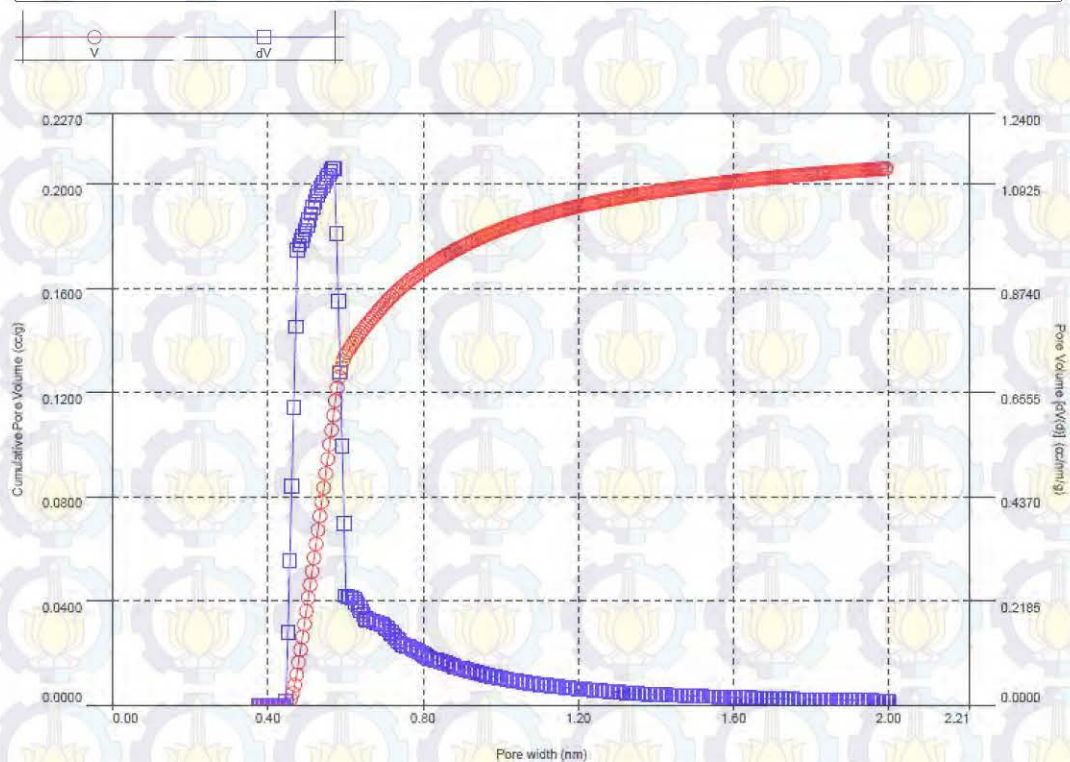
SF method summary  
Mode : 0.849 nm  
Micropore Volume : 0.187 cc/g



<b>Analysis</b>	Lab. Energi ITS	Date: 2015/01/02	<b>Report</b>	Lab. Energi ITS	Date: 2015/01/04
Operator:	ei-1156 zeolit	Filename:	Operator:	BET_iq_phisy_st.12015_01_02_16_34_09_01_EI-1156 ZTC.qps	
Sample Desc:		Comment:			
Sample Weight:	0.0526 g	Instrument:	Autosorb iQ Station 1	Extended info:	Available
Approx. Outgas Time:	41.4 hrs	Final Outgas Temp.:	300 °C	CellType:	9mm w/o rod
Analysis gas:	Nitrogen	Non-ideality:	6.58e-05 1/mmHg		
Analysis Time:	36:20 hr:min	Bath temp.:	77.35 K		
Analysis Mode:	Standard			VoidVol Remeasure:	off
VoidVol. Mode:	He Measure	Cold Zone V:	2.28048 cc	Warm Zone V:	16.957 cc

**HK method : Volume**

Data Reduction Parameters			
HK method Adsorbate	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
	Tabulated data interval: 1		
	Nitrogen	Temperature	77.350K
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section:	16.200 Å²
Adsorbent	Avg. Diameter: 0.300 nm	Polarizability:	1.460 (cc/molec) x 10 <sup>-24</sup>
	Molec. Density: 6.700 (mol/cm³) x 10 <sup>-14</sup>	Liquid Density:	0.806 g/cc
	Oxygen/Zeorlite	Magn. Suscept.:	2.000
	Atom Diameter: 0.276 nm	Surf. Atom Dens.:	13.100 (mol/cm²) x 10 <sup>-14</sup>
		Magn. Susc.:	1.300 (cc/molec) x 10 <sup>-24</sup>



HK method summary  
Mode : 0.567 nm

## LAMPIRAN K

### PERHITUNGAN KAPASITAS PENYIMPANAN HIDROGEN

1. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
Massa sampel : 0,301 gram  
Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
Suhu adsorpsi : 30°C  
Tekanan : 1 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,750	0,007	0,187	0,935
2	3,755	0,012	0,321	1,603
3	3,762	0,019	0,508	2,538
4	3,767	0,024	0,641	3,206
5	3,774	0,031	0,828	4,141
6	3,779	0,036	0,962	4,809
7	3,781	0,038	1,015	5,076
8	3,784	0,041	1,095	5,477
9	3,788	0,045	1,202	6,011
10	3,785	0,042	1,122	5,610
11	3,790	0,047	1,256	6,278
12	3,796	0,053	1,416	7,080
13	3,805	0,062	1,656	8,282
14	3,811	0,068	1,817	9,084
15	3,813	0,070	1,870	9,351
16	3,815	0,072	1,924	9,618
17	3,818	0,075	2,004	10,019
18	3,816	0,073	1,950	9,752
19	3,820	0,077	2,057	10,286
20	3,822	0,079	2,111	10,553
21	3,825	0,082	2,191	10,954
22	3,823	0,080	2,137	10,687
23	3,824	0,081	2,164	10,820
24	3,826	0,083	2,217	11,087
25	3,819	0,076	2,030	10,152
26	3,825	0,082	2,191	10,954
27	3,828	0,085	2,271	11,355

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
28	3,831	0,088	2,351	11,755
29	3,834	0,091	2,431	12,156
30	3,836	0,093	2,485	12,423
31	3,837	0,094	2,511	12,557
32	3,839	0,096	2,565	12,824
33	3,840	0,097	2,592	12,958
34	3,839	0,096	2,565	12,824
35	3,841	0,098	2,618	13,091
36	3,844	0,101	2,698	13,492
37	3,842	0,099	2,645	13,225
38	3,843	0,100	2,672	13,358
39	3,845	0,102	2,725	13,625
40	3,846	0,103	2,752	13,759
41	3,846	0,103	2,752	13,759
42	3,847	0,104	2,779	13,893
43	3,848	0,105	2,805	14,026
44	3,850	0,107	2,859	14,293
45	3,852	0,109	2,912	14,561
46	3,850	0,107	2,859	14,293
47	3,851	0,108	2,885	14,427
48	3,851	0,108	2,885	14,427
49	3,851	0,108	2,885	14,427
50	3,850	0,107	2,859	14,293
51	3,851	0,108	2,885	14,427
52	3,851	0,108	2,885	14,427
53	3,853	0,110	2,939	14,694
54	3,853	0,110	2,939	14,694
55	3,854	0,111	2,966	14,828
56	3,855	0,112	2,992	14,961
57	3,854	0,111	2,966	14,828
58	3,855	0,112	2,992	14,961
59	3,855	0,112	2,992	14,961
60	3,857	0,114	3,046	15,228
61	3,856	0,113	3,019	15,095
62	3,857	0,114	3,046	15,228
63	3,856	0,113	3,019	15,095
64	3,856	0,113	3,019	15,095
65	3,859	0,116	3,099	15,496
66	3,859	0,116	3,099	15,496

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
67	3,860	0,117	3,126	15,629
68	3,858	0,115	3,072	15,362
69	3,859	0,116	3,099	15,496
70	3,859	0,116	3,099	15,496
71	3,860	0,117	3,126	15,629
72	3,858	0,115	3,072	15,362
73	3,861	0,118	3,153	15,763
74	3,862	0,119	3,179	15,896
75	3,861	0,118	3,153	15,763
76	3,862	0,119	3,179	15,896
77*	3,863	0,120	3,206	16,030
78	3,863	0,120	3,206	16,030
79	3,863	0,120	3,206	16,030
80	3,863	0,120	3,206	16,030

2. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 40°C  
 Tekanan : 1 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,003	0,080	0,401
2	3,753	0,010	0,267	1,336
3	3,758	0,015	0,401	2,004
4	3,762	0,019	0,508	2,538
5	3,764	0,021	0,561	2,805
6	3,766	0,023	0,614	3,072
7	3,767	0,024	0,641	3,206
8	3,769	0,026	0,695	3,473
9	3,770	0,027	0,721	3,607
10	3,773	0,030	0,801	4,007
11	3,775	0,032	0,855	4,275
12	3,778	0,035	0,935	4,675

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
13	3,782	0,039	1,042	5,210
14	3,784	0,041	1,095	5,477
15	3,786	0,043	1,149	5,744
16	3,787	0,044	1,176	5,878
17	3,787	0,044	1,176	5,878
18	3,790	0,047	1,256	6,278
19	3,791	0,048	1,282	6,412
20	3,792	0,049	1,309	6,546
21	3,794	0,051	1,363	6,813
22	3,796	0,053	1,416	7,080
23	3,797	0,054	1,443	7,213
24	3,799	0,056	1,496	7,481
25	3,800	0,057	1,523	7,614
26	3,799	0,056	1,496	7,481
27	3,800	0,057	1,523	7,614
28	3,801	0,058	1,550	7,748
29	3,802	0,059	1,576	7,881
30	3,804	0,061	1,630	8,149
31	3,807	0,064	1,710	8,549
32	3,809	0,066	1,763	8,816
33	3,810	0,067	1,790	8,950
34	3,810	0,067	1,790	8,950
35	3,812	0,069	1,843	9,217
36	3,813	0,070	1,870	9,351
37	3,819	0,076	2,030	10,152
38	3,820	0,077	2,057	10,286
39	3,822	0,079	2,111	10,553
40	3,820	0,077	2,057	10,286
41	3,822	0,079	2,111	10,553
42	3,827	0,084	2,244	11,221
43	3,828	0,085	2,271	11,355
44	3,829	0,086	2,298	11,488
45	3,835	0,092	2,458	12,290
46	3,836	0,093	2,485	12,423
47	3,835	0,092	2,458	12,290
48	3,836	0,093	2,485	12,423
49	3,837	0,094	2,511	12,557
50	3,839	0,096	2,565	12,824
51	3,840	0,097	2,592	12,958

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
52	3,840	0,097	2,592	12,958
53	3,839	0,096	2,565	12,824
54	3,841	0,098	2,618	13,091
55	3,842	0,099	2,645	13,225
56	3,844	0,101	2,698	13,492
57	3,845	0,102	2,725	13,625
58	3,846	0,103	2,752	13,759
59	3,845	0,102	2,725	13,625
60	3,847	0,104	2,779	13,893
61	3,848	0,105	2,805	14,026
62	3,850	0,107	2,859	14,293
63	3,849	0,106	2,832	14,160
64	3,849	0,106	2,832	14,160
65	3,849	0,106	2,832	14,160
66	3,851	0,108	2,885	14,427
67	3,850	0,107	2,859	14,293
68	3,850	0,107	2,859	14,293
69	3,848	0,105	2,805	14,026
70	3,849	0,106	2,832	14,160
71	3,850	0,107	2,859	14,293
72	3,851	0,108	2,885	14,427
73	3,850	0,107	2,859	14,293
74*	3,851	0,108	2,885	14,427
75	3,851	0,108	2,885	14,427
76	3,851	0,108	2,885	14,427
77	3,851	0,108	2,885	14,427
78	3,851	0,108	2,885	14,427
79	3,847	0,104	2,779	13,893
80	3,838	0,095	2,538	12,690



3. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 50°C  
 Tekanan : 1 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,003	0,080	0,401
2	3,751	0,005	0,134	0,668
3	3,758	0,007	0,187	0,935
4	3,767	0,009	0,240	1,202
5	3,779	0,012	0,321	1,603
6	3,795	0,016	0,427	2,137
7	3,813	0,018	0,481	2,404
8	3,833	0,020	0,534	2,672
9	3,854	0,021	0,561	2,805
10	3,876	0,022	0,588	2,939
11	3,900	0,024	0,641	3,206
12	3,924	0,024	0,641	3,206
13	3,950	0,026	0,695	3,473
14	3,977	0,027	0,721	3,607
15	3,996	0,019	0,508	2,538
16	4,020	0,024	0,641	3,206
17	4,047	0,027	0,721	3,607
18	4,080	0,033	0,882	4,408
19	4,116	0,036	0,962	4,809
20	4,151	0,035	0,935	4,675
21	4,187	0,036	0,962	4,809
22	4,225	0,038	1,015	5,076
23	4,264	0,039	1,042	5,210
24	4,305	0,041	1,095	5,477
25	4,344	0,039	1,042	5,210
26	4,384	0,040	1,069	5,343
27	4,425	0,041	1,095	5,477
28	4,467	0,042	1,122	5,610
29	4,509	0,042	1,122	5,610
30	4,552	0,043	1,149	5,744

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
31	4,597	0,045	1,202	6,011
32	4,642	0,045	1,202	6,011
33	4,688	0,046	1,229	6,145
34	4,733	0,045	1,202	6,011
35	4,775	0,042	1,122	5,610
36	4,822	0,047	1,256	6,278
37	4,872	0,050	1,336	6,679
38	4,923	0,051	1,363	6,813
39	4,975	0,052	1,389	6,946
40	5,028	0,053	1,416	7,080
41	5,083	0,055	1,469	7,347
42	5,139	0,056	1,496	7,481
43	5,199	0,060	1,603	8,015
44	5,260	0,061	1,630	8,149
45	5,325	0,065	1,737	8,683
46	5,388	0,063	1,683	8,416
47	5,452	0,064	1,710	8,549
48	5,517	0,065	1,737	8,683
49	5,585	0,068	1,817	9,084
50	5,654	0,069	1,843	9,217
51	5,724	0,070	1,870	9,351
52	5,796	0,072	1,924	9,618
53	5,869	0,073	1,950	9,752
54	5,943	0,074	1,977	9,885
55	6,013	0,070	1,870	9,351
56	6,089	0,076	2,030	10,152
57	6,168	0,079	2,111	10,553
58	6,250	0,082	2,191	10,954
59	6,333	0,083	2,217	11,087
60	6,419	0,086	2,298	11,488
61	6,507	0,088	2,351	11,755
62	6,595	0,088	2,351	11,755
63	6,684	0,089	2,378	11,889
64	6,771	0,087	2,324	11,622
65	6,860	0,089	2,378	11,889
66	6,949	0,089	2,378	11,889
67	7,039	0,090	2,404	12,022
68	7,130	0,091	2,431	12,156
69	7,221	0,091	2,431	12,156

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
70	7,311	0,090	2,404	12,022
71	7,402	0,091	2,431	12,156
72	7,493	0,091	2,431	12,156
73*	7,585	0,092	2,458	12,290
74	7,677	0,092	2,458	12,290
75	7,769	0,092	2,458	12,290
76	7,861	0,092	2,458	12,290
77	7,950	0,089	2,378	11,889
78	8,037	0,087	2,324	11,622
79	8,120	0,083	2,217	11,087
80	8,199	0,079	2,111	10,553

4. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 30°C  
 Tekanan : 1,5 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,748	0,005	0,134	0,668
2	3,756	0,013	0,347	1,737
3	3,761	0,018	0,481	2,404
4	3,767	0,024	0,641	3,206
5	3,770	0,027	0,721	3,607
6	3,776	0,033	0,882	4,408
7	3,782	0,039	1,042	5,210
8	3,785	0,042	1,122	5,610
9	3,781	0,038	1,015	5,076
10	3,784	0,041	1,095	5,477
11	3,800	0,057	1,523	7,614
12	3,798	0,055	1,469	7,347
13	3,802	0,059	1,576	7,881
14	3,807	0,064	1,710	8,549
15	3,814	0,071	1,897	9,484

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
16	3,816	0,073	1,950	9,752
17	3,820	0,077	2,057	10,286
18	3,822	0,079	2,111	10,553
19	3,824	0,081	2,164	10,820
20	3,821	0,078	2,084	10,419
21	3,825	0,082	2,191	10,954
22	3,826	0,083	2,217	11,087
23	3,827	0,084	2,244	11,221
24	3,826	0,083	2,217	11,087
25	3,829	0,086	2,298	11,488
26	3,830	0,087	2,324	11,622
27	3,831	0,088	2,351	11,755
28	3,834	0,091	2,431	12,156
29	3,837	0,094	2,511	12,557
30	3,831	0,088	2,351	11,755
31	3,835	0,092	2,458	12,290
32	3,840	0,097	2,592	12,958
33	3,842	0,099	2,645	13,225
34	3,841	0,098	2,618	13,091
35	3,842	0,099	2,645	13,225
36	3,844	0,101	2,698	13,492
37	3,844	0,101	2,698	13,492
38	3,846	0,103	2,752	13,759
39	3,845	0,102	2,725	13,625
40	3,848	0,105	2,805	14,026
41	3,848	0,105	2,805	14,026
42	3,850	0,107	2,859	14,293
43	3,849	0,106	2,832	14,160
44	3,852	0,109	2,912	14,561
45	3,856	0,113	3,019	15,095
46	3,856	0,113	3,019	15,095
47	3,854	0,111	2,966	14,828
48	3,855	0,112	2,992	14,961
49	3,857	0,114	3,046	15,228
50	3,856	0,113	3,019	15,095
51	3,859	0,116	3,099	15,496
52	3,860	0,117	3,126	15,629
53	3,861	0,118	3,153	15,763
54	3,862	0,119	3,179	15,896

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
55	3,864	0,121	3,233	16,164
56	3,866	0,123	3,286	16,431
57	3,864	0,121	3,233	16,164
58	3,865	0,122	3,259	16,297
59	3,865	0,122	3,259	16,297
60	3,866	0,123	3,286	16,431
61	3,864	0,121	3,233	16,164
62	3,863	0,120	3,206	16,030
63	3,865	0,122	3,259	16,297
64	3,867	0,124	3,313	16,564
65	3,868	0,125	3,340	16,698
66	3,866	0,123	3,286	16,431
67	3,865	0,122	3,259	16,297
68	3,865	0,122	3,259	16,297
69	3,867	0,124	3,313	16,564
70	3,868	0,125	3,340	16,698
71	3,870	0,127	3,393	16,965
72	3,869	0,126	3,366	16,831
73	3,868	0,125	3,340	16,698
74	3,868	0,125	3,340	16,698
75	3,869	0,126	3,366	16,831
76*	3,870	0,127	3,393	16,965
77	3,870	0,127	3,393	16,965
78	3,870	0,127	3,393	16,965
79	3,870	0,127	3,393	16,965
80	3,862	0,119	3,179	15,896

5. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 40°C  
 Tekanan : 1,5 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,003	0,080	0,401
2	3,751	0,008	0,214	1,069
3	3,760	0,017	0,454	2,271
4	3,762	0,019	0,508	2,538
5	3,768	0,025	0,668	3,340
6	3,767	0,024	0,641	3,206
7	3,768	0,025	0,668	3,340
8	3,772	0,029	0,775	3,874
9	3,773	0,030	0,801	4,007
10	3,776	0,033	0,882	4,408
11	3,775	0,032	0,855	4,275
12	3,778	0,035	0,935	4,675
13	3,782	0,039	1,042	5,210
14	3,776	0,033	0,882	4,408
15	3,779	0,036	0,962	4,809
16	3,785	0,042	1,122	5,610
17	3,790	0,047	1,256	6,278
18	3,796	0,053	1,416	7,080
19	3,792	0,049	1,309	6,546
20	3,793	0,050	1,336	6,679
21	3,794	0,051	1,363	6,813
22	3,796	0,053	1,416	7,080
23	3,796	0,053	1,416	7,080
24	3,799	0,056	1,496	7,481
25	3,806	0,063	1,683	8,416
26	3,804	0,061	1,630	8,149
27	3,808	0,065	1,737	8,683
28	3,803	0,060	1,603	8,015
29	3,806	0,063	1,683	8,416
30	3,808	0,065	1,737	8,683

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
31	3,807	0,064	1,710	8,549
32	3,809	0,066	1,763	8,816
33	3,810	0,067	1,790	8,950
34	3,812	0,069	1,843	9,217
35	3,815	0,072	1,924	9,618
36	3,820	0,077	2,057	10,286
37	3,819	0,076	2,030	10,152
38	3,815	0,072	1,924	9,618
39	3,822	0,079	2,111	10,553
40	3,824	0,081	2,164	10,820
41	3,822	0,079	2,111	10,553
42	3,827	0,084	2,244	11,221
43	3,828	0,085	2,271	11,355
44	3,829	0,086	2,298	11,488
45	3,827	0,084	2,244	11,221
46	3,828	0,085	2,271	11,355
47	3,829	0,086	2,298	11,488
48	3,828	0,085	2,271	11,355
49	3,830	0,087	2,324	11,622
50	3,834	0,091	2,431	12,156
51	3,835	0,092	2,458	12,290
52	3,837	0,094	2,511	12,557
53	3,835	0,092	2,458	12,290
54	3,835	0,092	2,458	12,290
55	3,836	0,093	2,485	12,423
56	3,835	0,092	2,458	12,290
57	3,833	0,090	2,404	12,022
58	3,835	0,092	2,458	12,290
59	3,838	0,095	2,538	12,690
60	3,838	0,095	2,538	12,690
61	3,839	0,096	2,565	12,824
62	3,841	0,098	2,618	13,091
63	3,841	0,098	2,618	13,091
64	3,840	0,097	2,592	12,958
65	3,841	0,098	2,618	13,091
66	3,842	0,099	2,645	13,225
67	3,843	0,100	2,672	13,358
68	3,843	0,100	2,672	13,358
69	3,844	0,101	2,698	13,492

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
70	3,845	0,102	2,725	13,625
71	3,845	0,102	2,725	13,625
72	3,847	0,104	2,779	13,893
73	3,848	0,105	2,805	14,026
74	3,846	0,103	2,752	13,759
75	3,847	0,104	2,779	13,893
76	3,848	0,105	2,805	14,026
77	3,848	0,105	2,805	14,026
78*	3,849	0,106	2,832	14,160
79	3,849	0,106	2,832	14,160
80	3,849	0,106	2,832	14,160

6. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 50°C  
 Tekanan : 1,5 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,003	0,080	0,401
2	3,751	0,005	0,134	0,668
3	3,758	0,007	0,187	0,935
4	3,767	0,009	0,240	1,202
5	3,779	0,012	0,321	1,603
6	3,795	0,016	0,427	2,137
7	3,813	0,018	0,481	2,404
8	3,833	0,020	0,534	2,672
9	3,854	0,021	0,561	2,805
10	3,873	0,019	0,508	2,538
11	3,897	0,024	0,641	3,206
12	3,921	0,024	0,641	3,206
13	3,947	0,026	0,695	3,473
14	3,974	0,027	0,721	3,607
15	3,998	0,024	0,641	3,206



Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
16	4,025	0,027	0,721	3,607
17	4,056	0,031	0,828	4,141
18	4,089	0,033	0,882	4,408
19	4,125	0,036	0,962	4,809
20	4,164	0,039	1,042	5,210
21	4,200	0,036	0,962	4,809
22	4,238	0,038	1,015	5,076
23	4,277	0,039	1,042	5,210
24	4,318	0,041	1,095	5,477
25	4,355	0,037	0,989	4,943
26	4,394	0,039	1,042	5,210
27	4,435	0,041	1,095	5,477
28	4,474	0,039	1,042	5,210
29	4,515	0,041	1,095	5,477
30	4,556	0,041	1,095	5,477
31	4,600	0,044	1,176	5,878
32	4,645	0,045	1,202	6,011
33	4,691	0,046	1,229	6,145
34	4,736	0,045	1,202	6,011
35	4,784	0,048	1,282	6,412
36	4,834	0,050	1,336	6,679
37	4,886	0,052	1,389	6,946
38	4,937	0,051	1,363	6,813
39	4,991	0,054	1,443	7,213
40	5,054	0,063	1,683	8,416
41	5,118	0,064	1,710	8,549
42	5,181	0,063	1,683	8,416
43	5,246	0,065	1,737	8,683
44	5,312	0,066	1,763	8,816
45	5,380	0,068	1,817	9,084
46	5,449	0,069	1,843	9,217
47	5,520	0,071	1,897	9,484
48	5,592	0,072	1,924	9,618
49	5,666	0,074	1,977	9,885
50	5,741	0,075	2,004	10,019
51	5,822	0,081	2,164	10,820
52	5,903	0,081	2,164	10,820
53	5,982	0,079	2,111	10,553
54	6,062	0,080	2,137	10,687

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
55	6,140	0,078	2,084	10,419
56	6,221	0,081	2,164	10,820
57	6,300	0,079	2,111	10,553
58	6,382	0,082	2,191	10,954
59	6,462	0,080	2,137	10,687
60	6,545	0,083	2,217	11,087
61	6,628	0,083	2,217	11,087
62	6,713	0,085	2,271	11,355
63	6,795	0,082	2,191	10,954
64	6,882	0,087	2,324	11,622
65	6,968	0,086	2,298	11,488
66	7,053	0,085	2,271	11,355
67	7,137	0,084	2,244	11,221
68	7,224	0,087	2,324	11,622
69	7,312	0,088	2,351	11,755
70	7,400	0,088	2,351	11,755
71	7,489	0,089	2,378	11,889
72	7,579	0,090	2,404	12,022
73	7,671	0,092	2,458	12,290
74	7,764	0,093	2,485	12,423
75*	7,858	0,094	2,511	12,557
76	7,952	0,094	2,511	12,557
77	8,046	0,094	2,511	12,557
78	8,140	0,094	2,511	12,557
79	8,234	0,094	2,511	12,557
80	8,323	0,089	2,378	11,889

7. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 30°C  
 Tekanan : 2 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,750	0,007	0,187	0,935
2	3,756	0,013	0,347	1,737
3	3,764	0,021	0,561	2,805
4	3,767	0,024	0,641	3,206
5	3,777	0,034	0,908	4,542
6	3,782	0,039	1,042	5,210
7	3,781	0,038	1,015	5,076
8	3,785	0,042	1,122	5,610
9	3,790	0,047	1,256	6,278
10	3,793	0,050	1,336	6,679
11	3,800	0,057	1,523	7,614
12	3,798	0,055	1,469	7,347
13	3,802	0,059	1,576	7,881
14	3,807	0,064	1,710	8,549
15	3,814	0,071	1,897	9,484
16	3,816	0,073	1,950	9,752
17	3,820	0,077	2,057	10,286
18	3,822	0,079	2,111	10,553
19	3,824	0,081	2,164	10,820
20	3,821	0,078	2,084	10,419
21	3,825	0,082	2,191	10,954
22	3,826	0,083	2,217	11,087
23	3,827	0,084	2,244	11,221
24	3,826	0,083	2,217	11,087
25	3,829	0,086	2,298	11,488
26	3,830	0,087	2,324	11,622
27	3,831	0,088	2,351	11,755
28	3,834	0,091	2,431	12,156
29	3,837	0,094	2,511	12,557

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
30	3,839	0,096	2,565	12,824
31	3,838	0,095	2,538	12,690
32	3,840	0,097	2,592	12,958
33	3,842	0,099	2,645	13,225
34	3,841	0,098	2,618	13,091
35	3,842	0,099	2,645	13,225
36	3,844	0,101	2,698	13,492
37	3,844	0,101	2,698	13,492
38	3,846	0,103	2,752	13,759
39	3,845	0,102	2,725	13,625
40	3,848	0,105	2,805	14,026
41	3,848	0,105	2,805	14,026
42	3,850	0,107	2,859	14,293
43	3,849	0,106	2,832	14,160
44	3,852	0,109	2,912	14,561
45	3,856	0,113	3,019	15,095
46	3,856	0,113	3,019	15,095
47	3,854	0,111	2,966	14,828
48	3,855	0,112	2,992	14,961
49	3,857	0,114	3,046	15,228
50	3,859	0,116	3,099	15,496
51	3,861	0,118	3,153	15,763
52	3,860	0,117	3,126	15,629
53	3,861	0,118	3,153	15,763
54	3,862	0,119	3,179	15,896
55	3,865	0,122	3,259	16,297
56	3,865	0,122	3,259	16,297
57	3,864	0,121	3,233	16,164
58	3,865	0,122	3,259	16,297
59	3,868	0,125	3,340	16,698
60	3,863	0,120	3,206	16,030
61	3,865	0,122	3,259	16,297
62	3,868	0,125	3,340	16,698
63	3,866	0,123	3,286	16,431
64	3,867	0,124	3,313	16,564
65	3,868	0,125	3,340	16,698
66	3,870	0,127	3,393	16,965
67	3,871	0,128	3,420	17,099
68	3,871	0,128	3,420	17,099

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
69	3,874	0,131	3,500	17,499
70	3,871	0,128	3,420	17,099
71	3,872	0,129	3,446	17,232
72	3,875	0,132	3,527	17,633
73	3,875	0,132	3,527	17,633
74	3,874	0,131	3,500	17,499
75	3,875	0,132	3,527	17,633
76*	3,876	0,133	3,553	17,766
77	3,876	0,133	3,553	17,766
78	3,876	0,133	3,553	17,766
79	3,876	0,133	3,553	17,766
80	3,876	0,133	3,553	17,766

8. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram

Massa sampel : 0,301 gram

Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit

Suhu adsorpsi : 40°C

Tekanan : 2 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,003	0,080	0,401
2	3,754	0,011	0,294	1,469
3	3,758	0,015	0,401	2,004
4	3,762	0,019	0,508	2,538
5	3,764	0,021	0,561	2,805
6	3,767	0,024	0,641	3,206
7	3,768	0,025	0,668	3,340
8	3,772	0,029	0,775	3,874
9	3,773	0,030	0,801	4,007
10	3,775	0,032	0,855	4,275
11	3,775	0,032	0,855	4,275
12	3,778	0,035	0,935	4,675
13	3,782	0,039	1,042	5,210
14	3,784	0,041	1,095	5,477

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
15	3,789	0,046	1,229	6,145
16	3,788	0,045	1,202	6,011
17	3,790	0,047	1,256	6,278
18	3,792	0,049	1,309	6,546
19	3,792	0,049	1,309	6,546
20	3,793	0,050	1,336	6,679
21	3,794	0,051	1,363	6,813
22	3,796	0,053	1,416	7,080
23	3,796	0,053	1,416	7,080
24	3,799	0,056	1,496	7,481
25	3,806	0,063	1,683	8,416
26	3,804	0,061	1,630	8,149
27	3,806	0,063	1,683	8,416
28	3,803	0,060	1,603	8,015
29	3,806	0,063	1,683	8,416
30	3,808	0,065	1,737	8,683
31	3,807	0,064	1,710	8,549
32	3,809	0,066	1,763	8,816
33	3,810	0,067	1,790	8,950
34	3,812	0,069	1,843	9,217
35	3,813	0,070	1,870	9,351
36	3,817	0,074	1,977	9,885
37	3,819	0,076	2,030	10,152
38	3,820	0,077	2,057	10,286
39	3,822	0,079	2,111	10,553
40	3,824	0,081	2,164	10,820
41	3,822	0,079	2,111	10,553
42	3,827	0,084	2,244	11,221
43	3,828	0,085	2,271	11,355
44	3,829	0,086	2,298	11,488
45	3,828	0,085	2,271	11,355
46	3,836	0,093	2,485	12,423
47	3,838	0,095	2,538	12,690
48	3,837	0,094	2,511	12,557
49	3,839	0,096	2,565	12,824
50	3,832	0,089	2,378	11,889
51	3,840	0,097	2,592	12,958
52	3,841	0,098	2,618	13,091
53	3,843	0,100	2,672	13,358

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
54	3,845	0,102	2,725	13,625
55	3,845	0,102	2,725	13,625
56	3,847	0,104	2,779	13,893
57	3,848	0,105	2,805	14,026
58	3,846	0,103	2,752	13,759
59	3,847	0,104	2,779	13,893
60	3,848	0,105	2,805	14,026
61	3,847	0,104	2,779	13,893
62	3,849	0,106	2,832	14,160
63	3,848	0,105	2,805	14,026
64	3,850	0,107	2,859	14,293
65	3,848	0,105	2,805	14,026
66	3,849	0,106	2,832	14,160
67	3,851	0,108	2,885	14,427
68	3,849	0,106	2,832	14,160
69	3,850	0,107	2,859	14,293
70	3,850	0,107	2,859	14,293
71	3,851	0,108	2,885	14,427
72	3,852	0,109	2,912	14,561
73	3,851	0,108	2,885	14,427
74	3,851	0,108	2,885	14,427
75	3,852	0,109	2,912	14,561
76*	3,853	0,110	2,939	14,694
77	3,853	0,110	2,939	14,694
78	3,853	0,110	2,939	14,694
79	3,853	0,110	2,939	14,694
80	3,846	0,103	2,752	13,759

9. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,301 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 50°C  
 Tekanan : 2 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,743	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,003	0,080	0,401
2	3,751	0,005	0,134	0,668
3	3,758	0,007	0,187	0,935
4	3,767	0,009	0,240	1,202
5	3,779	0,012	0,321	1,603
6	3,795	0,016	0,427	2,137
7	3,813	0,018	0,481	2,404
8	3,833	0,020	0,534	2,672
9	3,854	0,021	0,561	2,805
10	3,873	0,019	0,508	2,538
11	3,897	0,024	0,641	3,206
12	3,921	0,024	0,641	3,206
13	3,947	0,026	0,695	3,473
14	3,974	0,027	0,721	3,607
15	3,999	0,025	0,668	3,340
16	4,026	0,027	0,721	3,607
17	4,057	0,031	0,828	4,141
18	4,090	0,033	0,882	4,408
19	4,126	0,036	0,962	4,809
20	4,165	0,039	1,042	5,210
21	4,201	0,036	0,962	4,809
22	4,239	0,038	1,015	5,076
23	4,278	0,039	1,042	5,210
24	4,319	0,041	1,095	5,477
25	4,356	0,037	0,989	4,943
26	4,395	0,039	1,042	5,210
27	4,436	0,041	1,095	5,477
28	4,475	0,039	1,042	5,210
29	4,516	0,041	1,095	5,477
30	4,557	0,041	1,095	5,477



Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
31	4,601	0,044	1,176	5,878
32	4,646	0,045	1,202	6,011
33	4,692	0,046	1,229	6,145
34	4,737	0,045	1,202	6,011
35	4,785	0,048	1,282	6,412
36	4,835	0,050	1,336	6,679
37	4,887	0,052	1,389	6,946
38	4,938	0,051	1,363	6,813
39	4,992	0,054	1,443	7,213
40	5,055	0,063	1,683	8,416
41	5,119	0,064	1,710	8,549
42	5,182	0,063	1,683	8,416
43	5,247	0,065	1,737	8,683
44	5,313	0,066	1,763	8,816
45	5,381	0,068	1,817	9,084
46	5,450	0,069	1,843	9,217
47	5,521	0,071	1,897	9,484
48	5,593	0,072	1,924	9,618
49	5,667	0,074	1,977	9,885
50	5,742	0,075	2,004	10,019
51	5,823	0,081	2,164	10,820
52	5,904	0,081	2,164	10,820
53	5,983	0,079	2,111	10,553
54	6,063	0,080	2,137	10,687
55	6,141	0,078	2,084	10,419
56	6,222	0,081	2,164	10,820
57	6,302	0,080	2,137	10,687
58	6,384	0,082	2,191	10,954
59	6,468	0,084	2,244	11,221
60	6,554	0,086	2,298	11,488
61	6,643	0,089	2,378	11,889
62	6,731	0,088	2,351	11,755
63	6,820	0,089	2,378	11,889
64	6,907	0,087	2,324	11,622
65	6,995	0,088	2,351	11,755
66	7,084	0,089	2,378	11,889
67	7,174	0,090	2,404	12,022
68	7,266	0,092	2,458	12,290
69	7,359	0,093	2,485	12,423

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
70	7,452	0,093	2,485	12,423
71	7,546	0,094	2,511	12,557
72	7,639	0,093	2,485	12,423
73*	7,734	0,095	2,538	12,690
74	7,829	0,095	2,538	12,690
75	7,924	0,095	2,538	12,690
76	8,019	0,095	2,538	12,690
77	8,114	0,095	2,538	12,690
78	8,200	0,086	2,298	11,488
79	8,282	0,082	2,191	10,954
80	8,361	0,079	2,111	10,553

10. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,300 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 30°C  
 Tekanan : 3 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,742	0,000	0,000	0,000
1	3,750	0,008	0,214	1,069
2	3,756	0,014	0,374	1,871
3	3,763	0,021	0,561	2,806
4	3,767	0,025	0,668	3,340
5	3,776	0,034	0,909	4,543
6	3,781	0,039	1,042	5,211
7	3,783	0,041	1,096	5,478
8	3,786	0,044	1,176	5,879
9	3,790	0,048	1,283	6,414
10	3,792	0,050	1,336	6,681
11	3,797	0,055	1,470	7,349
12	3,802	0,060	1,603	8,017
13	3,805	0,063	1,684	8,418
14	3,810	0,068	1,817	9,086
15	3,814	0,072	1,924	9,621

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
16	3,816	0,074	1,978	9,888
17	3,819	0,077	2,058	10,289
18	3,821	0,079	2,111	10,556
19	3,824	0,082	2,191	10,957
20	3,824	0,082	2,191	10,957
21	3,823	0,081	2,165	10,823
22	3,825	0,083	2,218	11,090
23	3,826	0,084	2,245	11,224
24	3,827	0,085	2,272	11,358
25	3,829	0,087	2,325	11,625
26	3,830	0,088	2,352	11,758
27	3,831	0,089	2,378	11,892
28	3,834	0,092	2,459	12,293
29	3,836	0,094	2,512	12,560
30	3,838	0,096	2,565	12,827
31	3,837	0,095	2,539	12,694
32	3,839	0,097	2,592	12,961
33	3,841	0,099	2,646	13,228
34	3,847	0,105	2,806	14,030
35	3,849	0,107	2,859	14,297
36	3,849	0,107	2,859	14,297
37	3,851	0,109	2,913	14,564
38	3,850	0,108	2,886	14,431
39	3,851	0,109	2,913	14,564
40	3,852	0,110	2,940	14,698
41	3,852	0,110	2,940	14,698
42	3,854	0,112	2,993	14,965
43	3,856	0,114	3,046	15,232
44	3,857	0,115	3,073	15,366
45	3,858	0,116	3,100	15,500
46	3,858	0,116	3,100	15,500
47	3,859	0,117	3,127	15,633
48	3,858	0,116	3,100	15,500
49	3,859	0,117	3,127	15,633
50	3,861	0,119	3,180	15,901
51	3,869	0,127	3,394	16,970
52	3,874	0,132	3,528	17,638
53	3,875	0,133	3,554	17,771
54	3,877	0,135	3,608	18,038

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
55	3,878	0,136	3,634	18,172
56	3,878	0,136	3,634	18,172
57	3,879	0,137	3,661	18,306
58	3,880	0,138	3,688	18,439
59	3,878	0,136	3,634	18,172
60	3,881	0,139	3,715	18,573
61	3,881	0,139	3,715	18,573
62	3,882	0,140	3,741	18,707
63	3,881	0,139	3,715	18,573
64	3,882	0,140	3,741	18,707
65	3,883	0,141	3,768	18,840
66	3,883	0,141	3,768	18,840
67	3,882	0,140	3,741	18,707
68	3,882	0,140	3,741	18,707
69	3,884	0,142	3,795	18,974
70	3,883	0,141	3,768	18,840
71	3,883	0,141	3,768	18,840
72	3,882	0,140	3,741	18,707
73	3,882	0,140	3,741	18,707
74	3,883	0,141	3,768	18,840
75	3,884	0,142	3,795	18,974
76	3,884	0,142	3,795	18,974
77*	3,885	0,143	3,821	19,107
78	3,885	0,143	3,821	19,107
79	3,885	0,143	3,821	19,107
80	3,885	0,143	3,821	19,107

11. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,300 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 40°C  
 Tekanan : 3 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,742	0,000	0,000	0,000
1	3,746	0,004	0,107	0,534
2	3,754	0,012	0,321	1,603
3	3,759	0,017	0,454	2,272
4	3,762	0,020	0,534	2,672
5	3,765	0,023	0,615	3,073
6	3,767	0,025	0,668	3,340
7	3,768	0,026	0,695	3,474
8	3,769	0,027	0,722	3,608
9	3,772	0,030	0,802	4,009
10	3,775	0,033	0,882	4,409
11	3,776	0,034	0,909	4,543
12	3,777	0,035	0,935	4,677
13	3,781	0,039	1,042	5,211
14	3,784	0,042	1,122	5,612
15	3,790	0,048	1,283	6,414
16	3,789	0,047	1,256	6,280
17	3,790	0,048	1,283	6,414
18	3,792	0,050	1,336	6,681
19	3,793	0,051	1,363	6,815
20	3,795	0,053	1,416	7,082
21	3,794	0,052	1,390	6,948
22	3,796	0,054	1,443	7,215
23	3,795	0,053	1,416	7,082
24	3,794	0,052	1,390	6,948
25	3,795	0,053	1,416	7,082
26	3,797	0,055	1,470	7,349
27	3,802	0,060	1,603	8,017
28	3,803	0,061	1,630	8,151
29	3,803	0,061	1,630	8,151
30	3,806	0,064	1,710	8,552

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
31	3,806	0,064	1,710	8,552
32	3,809	0,067	1,790	8,952
33	3,812	0,070	1,871	9,353
34	3,812	0,070	1,871	9,353
35	3,815	0,073	1,951	9,754
36	3,818	0,076	2,031	10,155
37	3,820	0,078	2,084	10,422
38	3,820	0,078	2,084	10,422
39	3,823	0,081	2,165	10,823
40	3,824	0,082	2,191	10,957
41	3,822	0,080	2,138	10,689
42	3,824	0,082	2,191	10,957
43	3,825	0,083	2,218	11,090
44	3,828	0,086	2,298	11,491
45	3,835	0,093	2,485	12,427
46	3,835	0,093	2,485	12,427
47	3,837	0,095	2,539	12,694
48	3,836	0,094	2,512	12,560
49	3,838	0,096	2,565	12,827
50	3,838	0,096	2,565	12,827
51	3,839	0,097	2,592	12,961
52	3,840	0,098	2,619	13,095
53	3,842	0,100	2,672	13,362
54	3,844	0,102	2,726	13,629
55	3,844	0,102	2,726	13,629
56	3,846	0,104	2,779	13,896
57	3,847	0,105	2,806	14,030
58	3,849	0,107	2,859	14,297
59	3,851	0,109	2,913	14,564
60	3,849	0,107	2,859	14,297
61	3,852	0,110	2,940	14,698
62	3,852	0,110	2,940	14,698
63	3,853	0,111	2,966	14,832
64	3,855	0,113	3,020	15,099
65	3,855	0,113	3,020	15,099
66	3,858	0,116	3,100	15,500
67	3,860	0,118	3,153	15,767
68	3,862	0,120	3,207	16,034
69	3,863	0,121	3,234	16,168

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
70	3,862	0,120	3,207	16,034
71	3,863	0,121	3,234	16,168
72	3,863	0,121	3,234	16,168
73	3,864	0,122	3,260	16,301
74*	3,862	0,120	3,207	16,034
75	3,862	0,120	3,207	16,034
76	3,862	0,120	3,207	16,034
77	3,862	0,120	3,207	16,034
78	3,856	0,114	3,046	15,232
79	3,848	0,106	2,833	14,164
80	3,841	0,099	2,646	13,228

12. Kapasitas penyimpanan H<sub>2</sub> pada Karbon hasil aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> rasio 1,5

Massa holder : 3,442 gram  
 Massa sampel : 0,300 gram  
 Aliran gas H<sub>2</sub> : 20 mL/menit  
 Suhu adsorpsi : 50°C  
 Tekanan : 3 bar

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
0	3,742	0,000	0,000	0,000
1	3,745	0,003	0,080	0,401
2	3,752	0,007	0,187	0,935
3	3,761	0,009	0,241	1,203
4	3,772	0,011	0,294	1,470
5	3,787	0,015	0,401	2,004
6	3,803	0,016	0,428	2,138
7	3,821	0,018	0,481	2,405
8	3,841	0,020	0,534	2,672
9	3,862	0,021	0,561	2,806
10	3,884	0,022	0,588	2,940
11	3,908	0,024	0,641	3,207
12	3,932	0,024	0,641	3,207
13	3,958	0,026	0,695	3,474
14	3,985	0,027	0,722	3,608
15	4,010	0,025	0,668	3,340

Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
16	4,037	0,027	0,722	3,608
17	4,068	0,031	0,828	4,142
18	4,101	0,033	0,882	4,409
19	4,137	0,036	0,962	4,810
20	4,172	0,035	0,935	4,677
21	4,208	0,036	0,962	4,810
22	4,246	0,038	1,015	5,077
23	4,285	0,039	1,042	5,211
24	4,326	0,041	1,096	5,478
25	4,367	0,041	1,096	5,478
26	4,407	0,040	1,069	5,345
27	4,448	0,041	1,096	5,478
28	4,487	0,039	1,042	5,211
29	4,528	0,041	1,096	5,478
30	4,569	0,041	1,096	5,478
31	4,613	0,044	1,176	5,879
32	4,658	0,045	1,203	6,013
33	4,704	0,046	1,229	6,146
34	4,749	0,045	1,203	6,013
35	4,797	0,048	1,283	6,414
36	4,847	0,050	1,336	6,681
37	4,899	0,052	1,390	6,948
38	4,950	0,051	1,363	6,815
39	5,004	0,054	1,443	7,215
40	5,067	0,063	1,684	8,418
41	5,131	0,064	1,710	8,552
42	5,194	0,063	1,684	8,418
43	5,259	0,065	1,737	8,685
44	5,325	0,066	1,764	8,819
45	5,393	0,068	1,817	9,086
46	5,462	0,069	1,844	9,220
47	5,533	0,071	1,897	9,487
48	5,605	0,072	1,924	9,621
49	5,679	0,074	1,978	9,888
50	5,754	0,075	2,004	10,021
51	5,835	0,081	2,165	10,823
52	5,916	0,081	2,165	10,823
53	5,995	0,079	2,111	10,556
54	6,074	0,079	2,111	10,556



Waktu (menit)	Massa sampel + holder (gram)	$\Delta m$ (gram)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (%berat)	Kapasitas adsorpsi H <sub>2</sub> (mmol.g <sup>-1</sup> )
55	6,157	0,083	2,218	11,090
56	6,242	0,085	2,272	11,358
57	6,325	0,083	2,218	11,090
58	6,410	0,085	2,272	11,358
59	6,494	0,084	2,245	11,224
60	6,580	0,086	2,298	11,491
61	6,669	0,089	2,378	11,892
62	6,757	0,088	2,352	11,758
63	6,846	0,089	2,378	11,892
64	6,936	0,090	2,405	12,026
65	7,026	0,090	2,405	12,026
66	7,115	0,089	2,378	11,892
67	7,205	0,090	2,405	12,026
68	7,297	0,092	2,459	12,293
69	7,390	0,093	2,485	12,427
70	7,484	0,094	2,512	12,560
71	7,580	0,096	2,565	12,827
72	7,675	0,095	2,539	12,694
73	7,771	0,096	2,565	12,827
74	7,868	0,097	2,592	12,961
75	7,965	0,097	2,592	12,961
76*	8,063	0,098	2,619	13,095
77	8,161	0,098	2,619	13,095
78	8,259	0,098	2,619	13,095
79	8,357	0,098	2,619	13,095
80	8,446	0,089	2,378	11,892

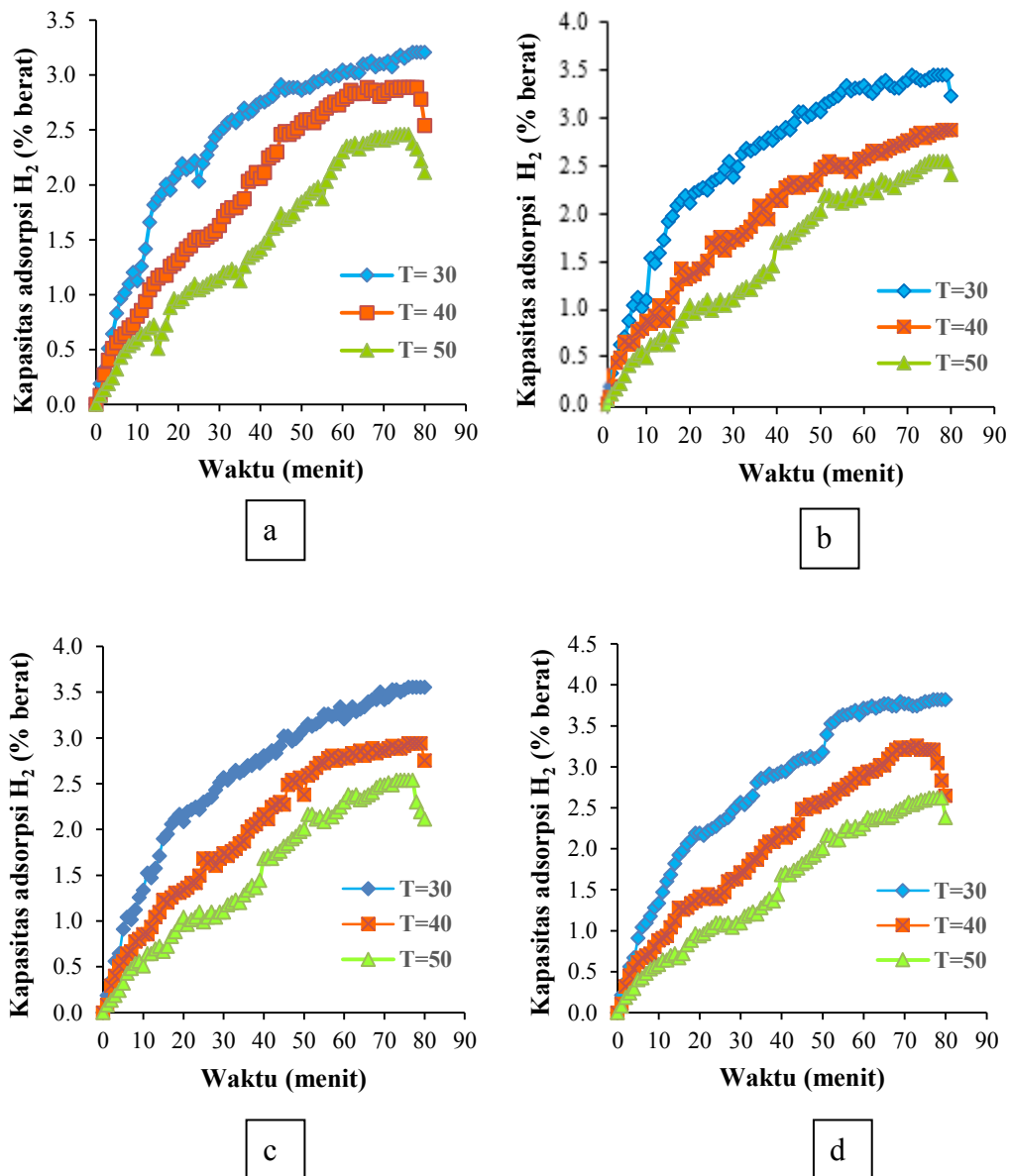
Keterangan :

$$\Delta m = m_t - m_0$$

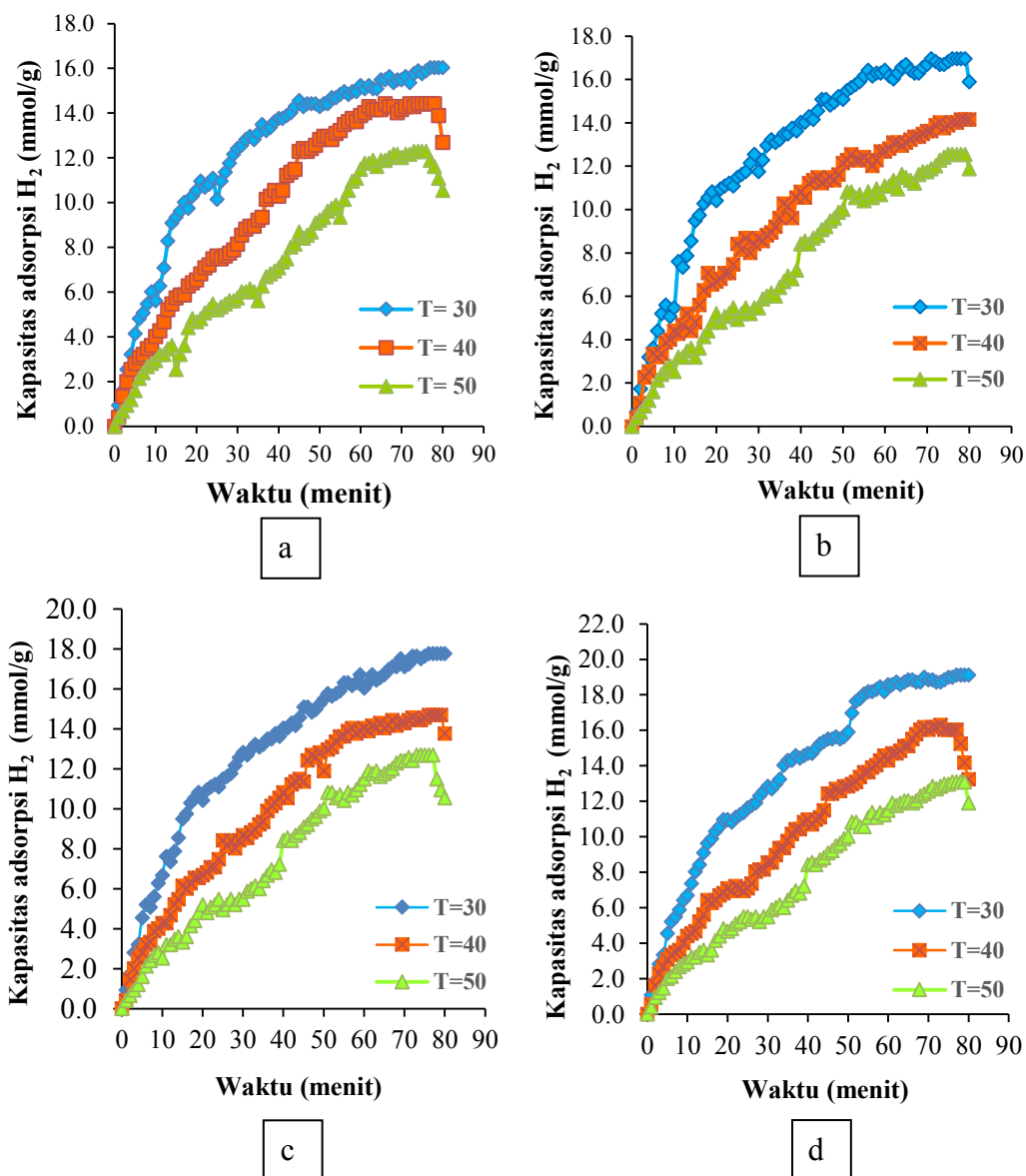
$m_t$  = massa sampel + holder pada menit ke-t

$m_0$  = massa sampel + holder pada menit ke-0

$$\% \text{ berat hidrogen} = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100\%$$



Gambar K.1 Grafik pola adsorpsi hidrogen pada karbon teremplat zeolit teraktivasi dengan perbandingan  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 pada tekanan (a) 1 bar; (b) 1,5 bar (c) 2 bar dan (d) 3 bar (dalam satuan % berat)



Gambar K.1 Grafik pola adsorpsi hidrogen pada karbon teremplat zeolit teraktivasi dengan perbandingan  $K_2CO_3$ /Karbon 1,5 pada tekanan (a) 1 bar; (b) 1,5 bar (c) 2 bar dan (d) 3 bar (dalam satuan  $mmol.g^{-1}$ )

## LAMPIRAN L

### PERHITUNGAN ANALISA DATA ISOTERM

#### 1. Model Isoterm Langmuir

Model isoterm Langmuir dapat diperoleh dengan membuat plot data antara  $P/q_e$  sebagai sumbu y dan  $P$  sebagai sumbu x. Bentuk persamaan regresi liniernya adalah :

$$\frac{P}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{P}{q_m} \quad (\text{L.1})$$

keterangan :

$q_e$  = kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (% berat atau mmol.g<sup>-1</sup>)

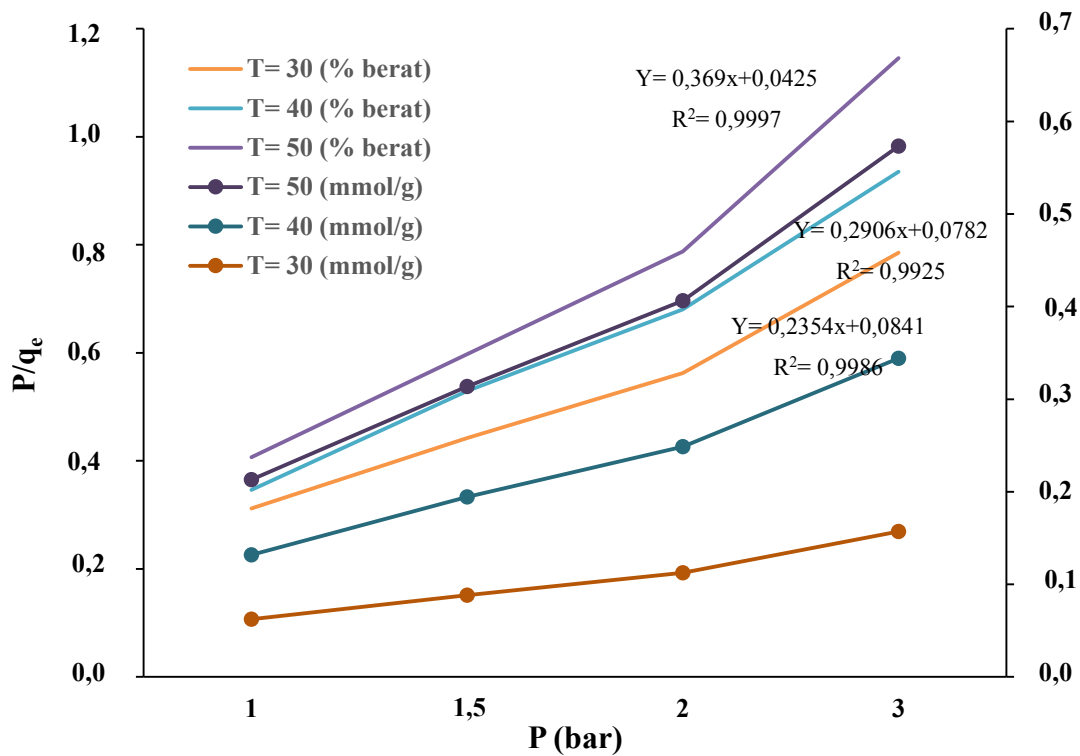
$q_m$  = kapasitas adsorpsi pada saat maksimum (% berat atau mmol.g<sup>-1</sup>)

$K_L$  = konstanta adsorpsi Langmuir (bar<sup>-1</sup>)

$P$  = tekanan adsorpsi (bar)

**Tabel L.1 Hasil perhitungan model isoterm Langmuir**

T (K)	P (bar)	dalam % berat		dalam mmol.g <sup>-1</sup>	
		$q_e$	$P/q_e$	$q_e$	$P/q_e$
	x		y		y
303	1	3,206	0,312	16,030	0,062
	1,5	3,393	0,442	16,965	0,088
	2	3,553	0,563	17,766	0,113
	3	3,821	0,785	19,107	0,157
313	1	2,885	0,347	14,427	0,069
	1,5	2,832	0,530	14,160	0,106
	2	2,939	0,681	14,694	0,136
	3	3,207	0,936	16,034	0,187
323	1	2,458	0,407	12,290	0,081
	1,5	2,511	0,597	12,557	0,119
	2	2,538	0,788	12,690	0,158
	3	2,619	1,146	13,095	0,229



Gambar L.1 Kurva adsorpsi isoterm Langmuir karbon tertemplat zeolit-Y setelah proses aktivasi dengan rasio  $K_2CO_3$  (gr)/ Karbon (gr) = 1,5

Untuk mendapatkan nilai  $K_L$  dan  $q_m$  dapat dihitung sesuai dengan persamaan L.1 sebagai berikut :

$$\frac{P}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{P}{q_m}$$

$$Y = a + b x$$

Perhitungan dengan  $T = 30^\circ C$  (% berat) :

Regresi linier	$Y = 0,2354x + 0,0841$
$b = 1/q_m$	0,2354
$q_m$	4,2481
$a = 1/K_L \cdot q_m$	0,0841
$1/a$	11,8906
$K_L$	2,7990

## 2. Model Isoterm Freundlich

Model isoterm Freundlich dapat diperoleh dengan membuat plot data antara  $\log q_e$  sebagai sumbu y dan  $\log P$  sebagai sumbu x. Bentuk persamaan regresi liniernya adalah :

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log P \quad (\text{L.2})$$

keterangan :

$q_e$  = kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (% berat atau  $\text{mmol.g}^{-1}$ )

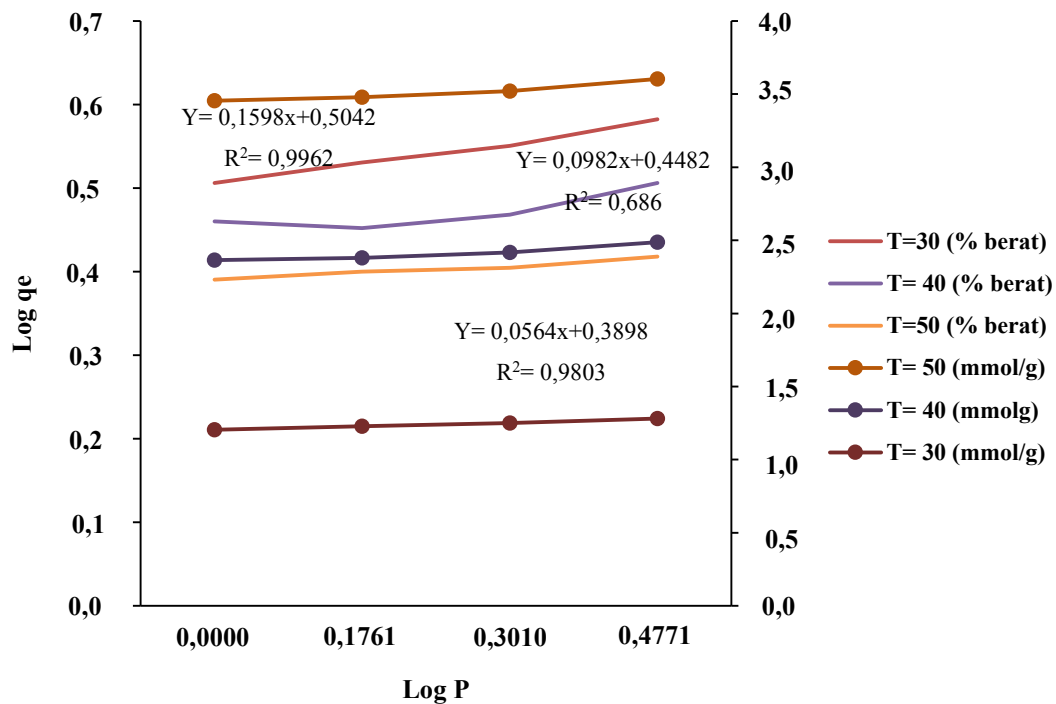
$1/n$  = parameter intensitas Freundlich

$K_F$  = konstanta adsorpsi Freundlich  $(\text{mmol/g})/(\text{bar})^{1/n}$

$P$  = tekanan adsorpsi (bar)

**Tabel L.2 Hasil perhitungan model isoterm Freundlich**

T (K)	Log P (bar)	Log $q_e$ (% berat)	Log $q_e$ ( $\text{mmol.g}^{-1}$ )
	x	y	y
303	0,0000	0,506	1,205
	0,1761	0,531	1,230
	0,3010	0,551	1,250
	0,4771	0,582	1,281
313	0,0000	0,460	1,159
	0,1761	0,452	1,151
	0,3010	0,468	1,167
	0,4771	0,506	1,205
323	0,0000	0,391	1,090
	0,1761	0,400	1,090
	0,3010	0,405	1,103
	0,4771	0,418	1,117



Gambar L.2 Kurva adsorpsi isoterm Freundlich karbon tertemplat zeolit-Y setelah proses aktivasi dengan rasio  $K_2CO_3$  (gr)/ Karbon (gr) = 1,5

Untuk mendapatkan nilai  $K_F$  dan  $1/n$  dapat dihitung sesuai dengan persamaan L.2 sebagai berikut :

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log P$$

$$Y = a + b x$$

Perhitungan dengan  $T = 30^\circ C$  (% berat) :

Regresi linier	$Y = 0,1598x + 0,5042$
$b = 1/n$	0,1598
$n$	6,2578
$a = \log K_F$	0,5042
$K_F$	3,1930

### 3. Model Isoterm Tempkin

Model isoterm Tempkin dapat diperoleh dengan membuat plot data antara  $q_e$  sebagai sumbu y dan  $\ln P$  sebagai sumbu x. Bentuk persamaan regresi liniernya adalah :

$$q_e = B_1 \ln K_T + B_1 \ln P \quad (\text{L.3})$$

keterangan :

$q_e$  = kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (% berat atau mmol.g<sup>-1</sup>)

B = konstanta bagian adsorpsi

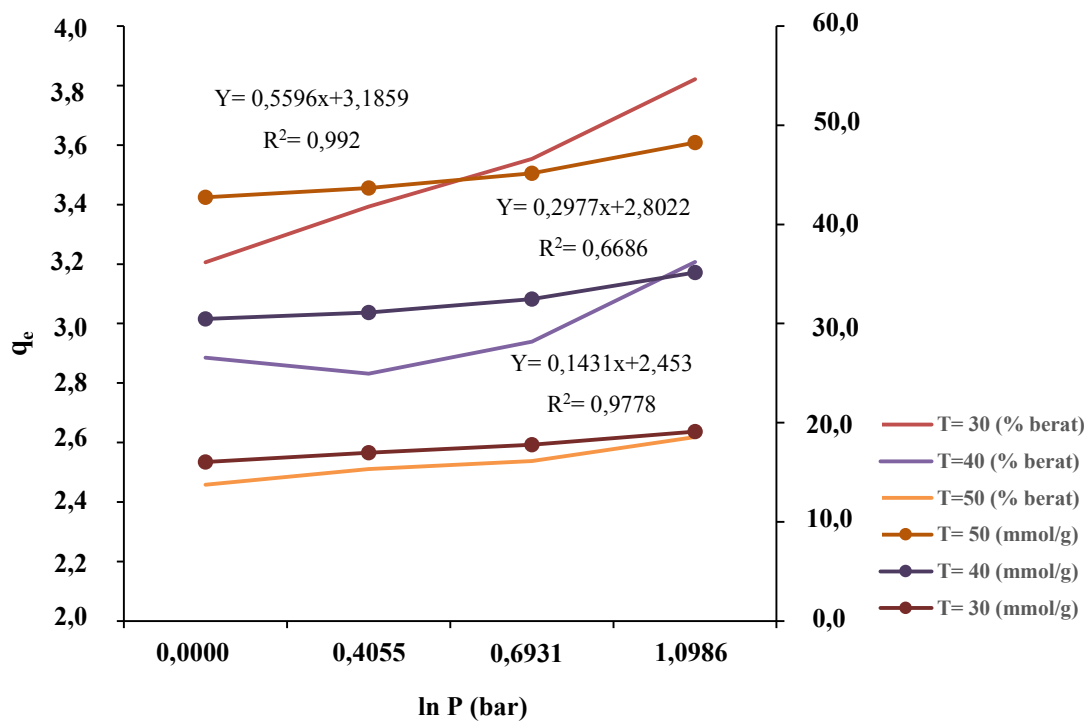
$K_T$  = konstanta adsorpsi Tempkin (bar<sup>-1</sup>)

P = tekanan adsorpsi (bar)

**Tabel L.3 Hasil perhitungan model isoterm Tempkin**

T (K)	ln P (bar)	qe (% berat)	qe (mmol.g <sup>-1</sup> )
	x	y	
303	0,0000	3,206	16,030
	0,4055	3,393	16,965
	0,6931	3,553	17,766
	1,0986	3,821	19,107
313	0,0000	2,885	14,427
	0,4055	2,832	14,160
	0,6931	2,939	14,694
	1,0986	3,207	16,030
323	0,0000	2,458	12,290
	0,4055	2,511	12,557
	0,6931	2,538	12,690
	1,0986	2,619	13,095





Gambar L.3 Kurva adsorpsi isoterm Tempkin karbon tertemplat zeolit-Y setelah proses aktivasi dengan rasio  $K_2CO_3$  (gr)/ Karbon (gr) = 1,5

Untuk mendapatkan nilai  $K_T$  dan  $B$  dapat dihitung sesuai dengan persamaan L.3 sebagai berikut :

$$q_e = B_1 \ln K_T + B_1 \ln P$$

$$Y = a + b x$$

Perhitungan dengan  $T = 30^\circ C$  (% berat) :

Regresi Linier	$y = 0,5596x + 3,1859$
$b = B = RT/b$	0,5596
$a = RT/b \cdot \ln K_T$	3,1859
$0,5596 \ln K_T$	3,1859
$\ln K_T$	5,6932
$K_T$	296,8342

#### 4. Model Isoterm Sips

Model isoterm Sips dapat diperoleh dengan membuat plot data antara  $\ln (1/q_e - 1/q_m)$  sebagai sumbu y dan  $\ln P$  sebagai sumbu x. Bentuk persamaan regresi liniernya adalah :

$$\ln \left( \frac{1}{q_e} - \frac{1}{q_m} \right) = \ln \left( \frac{K_S^{-\frac{1}{n}}}{q_m} \right) - \frac{1}{n} \ln P \quad (\text{L.4})$$

keterangan :

$q_e$  = kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (% berat atau mmol.g<sup>-1</sup>)

$q_m$  = kapasitas adsorpsi pada saat maksimum (% berat atau mmol.g<sup>-1</sup>)

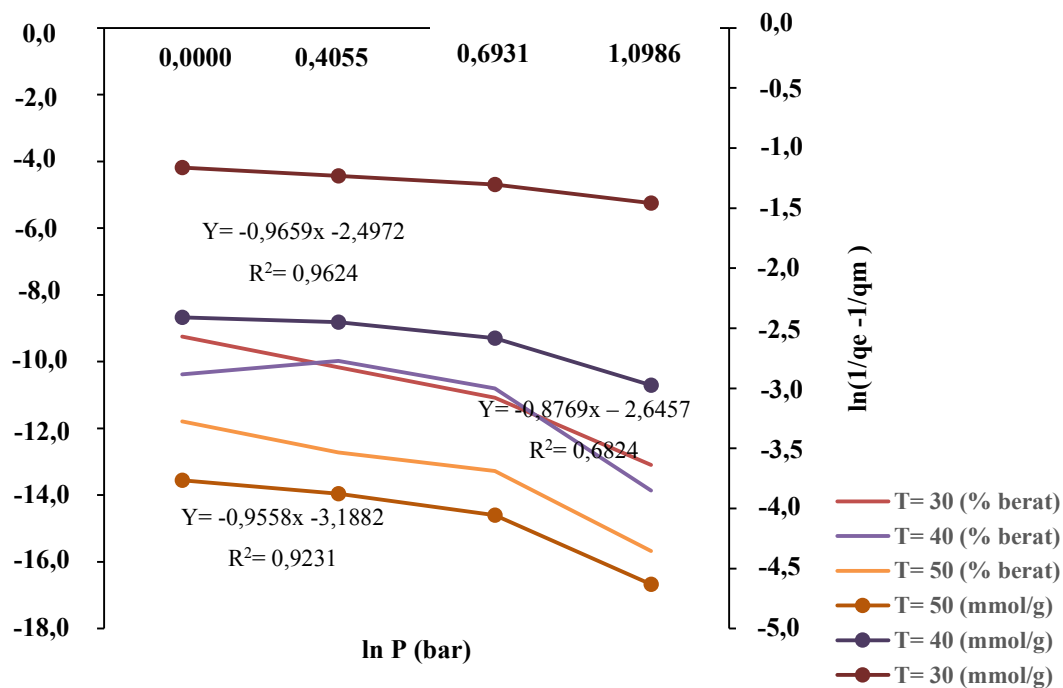
$1/n$  = parameter intensitas Sips

$K_S$  = konstanta adsorpsi Sips (bar<sup>-1</sup>)

$P$  = tekanan adsorpsi (bar)

**Tabel L.4 Hasil perhitungan model isoterm Sips**

T (K)	ln P (bar)	ln(1/q <sub>e</sub> - 1/q <sub>m</sub> )	q <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>	q <sub>m</sub>	1/q <sub>m</sub>
		% berat				
	x	y				
303	0,0000	-2,570	3,206	0,312	4,248	0,235
	0,4055	-2,825	3,393	0,295	4,248	0,235
	0,6931	-3,078	3,553	0,281	4,248	0,235
	1,0986	-3,638	3,821	0,262	4,248	0,235
313	0,0000	-2,883	2,885	0,347	3,441	0,291
	0,4055	-2,772	2,832	0,353	3,441	0,291
	0,6931	-3,002	2,939	0,340	3,441	0,291
	1,0986	-3,852	3,207	0,312	3,441	0,291
323	0,0000	-3,274	2,458	0,407	2,710	0,369
	0,4055	-3,534	2,511	0,398	2,710	0,369
	0,6931	-3,689	2,538	0,394	2,710	0,369
	1,0986	-4,356	2,619	0,382	2,710	0,369



Gambar L.4 Kurva adsorpsi isoterm Sips karbon tertemplat zeolit-Y setelah proses aktivasi dengan rasio K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (gr)/ Karbon (gr) = 1,5

Untuk mendapatkan nilai K<sub>s</sub> dan 1/n dapat dihitung sesuai dengan persamaan L.4 sebagai berikut :

$$\ln\left(\frac{1}{q_e} - \frac{1}{q_m}\right) = \ln\left(\frac{K_s^{-\frac{1}{n}}}{q_m}\right) - \frac{1}{n} \ln P$$

$$Y = a + b x$$

Perhitungan dengan T= 30°C (% berat) :

Regresi linier	y = -0,9659x - 2,4972
b= 1/n	-0,9659
n	-1,0353
a= ln(K <sup>^(-1/n)/ qm</sup> )	-2,4972
K <sub>s</sub>	0,3370
q <sub>m</sub>	4,2481

## LAMPIRAN M

### PERHITUNGAN ANALISA DATA TERMODINAMIKA

Analisa data termodinamika dalam penelitian ini meliputi penentuan entalpi adsorpsi ( $\Delta H^\circ$ ), entropi adsorpsi ( $\Delta S^\circ$ ) dan perubahan energi bebas Gibbs atau energi adsorpsi ( $\Delta G^\circ$ ). Parameter-parameter termodinamik tersebut dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan M.1 dan Persamaan M.2.

$$\ln P_{H_2} = 2 \left( \frac{\Delta H_H}{RT} - \frac{\Delta S_H}{R} \right) \quad (M.1)$$

keterangan :

$\Delta H_H$  = entalpi adsorpsi hidrogen (kJ/mol)

$\Delta S_H$  = entropi adsorpsi hidrogen (kJ/mol)

R = tetapan gas (8,314 J/mol K)

T = suhu (K)

$P_{H_2} = P/P^0$  = tekanan sistem/tekanan awal (bar)

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln K_L^\circ = \Delta H_{ads}^\circ - T\Delta S_{ads}^\circ \quad (M.2)$$

keterangan :

$\Delta H_H$  = entalpi adsorpsi hidrogen (kJ/mol)

$\Delta S_H$  = entropi adsorpsi hidrogen (kJ/mol)

$\Delta S_H$  = entropi adsorpsi hidrogen (J/mol K)

R = tetapan gas (8,314 J/mol K)

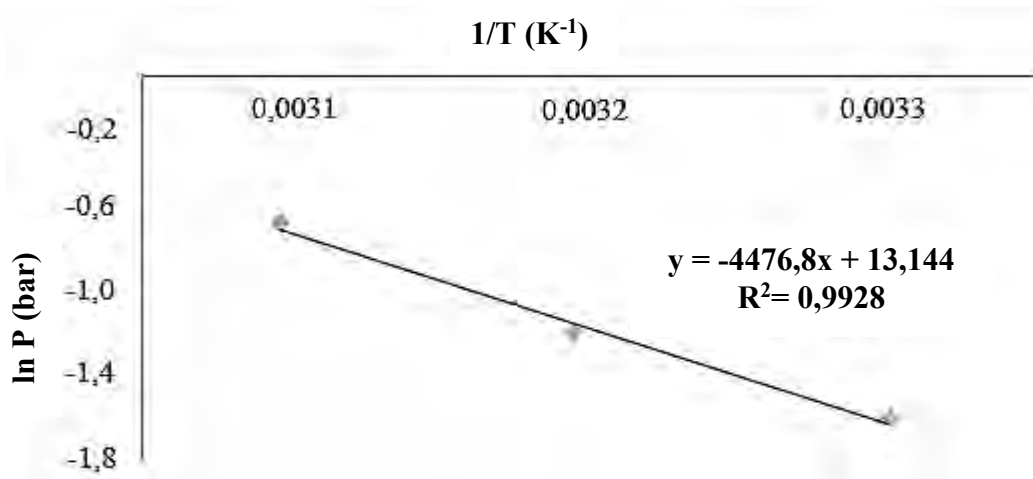
T = suhu (K)

#### 1. Penentuan entalpi adsorpsi ( $\Delta H^\circ$ )

Entalpi adsorpsi dapat dihitung dengan plot linear antara  $\ln P$  sebagai sumbu y dan  $1/T$  sebagai sumbu x melalui Persamaan M.1. Nilai slope yang diperoleh merupakan ( $2\Delta H_H/R$ ).

Tabel M.1 Hasil perhitungan entalpi dan entropi adsorpsi

T (°C)	T (K)	1/T (K)	P <sup>0</sup> (bar)	P (bar)	P/P <sup>0</sup> (P <sub>H<sub>2</sub></sub> )	ln P <sub>H<sub>2</sub></sub>
30	303	0,003300	1	0,2	0,2	-1,60944
40	313	0,003195		0,3	0,3	-1,20397
50	323	0,003096		0,5	0,5	-0,69315



Gambar M.1 Kurva tekanan sebagai fungsi suhu

Berdasarkan grafik diatas, harga  $\Delta H^0$  dapat dihitung dari slope sebagai berikut

$$y = -4476,8x + 13,144$$

$$y = bx + a$$

Sehingga diperoleh,

$$b = 2 \times \frac{\Delta H^0}{R} = -4476,8$$

$$\Delta H^0 = \frac{-4476,8 \times 8,314}{2}$$

$$\Delta H^0 = -18610,0576 \text{ J/mol}$$

$$\Delta H^0 = -18,610 \text{ kJ/mol}$$

## 2. Penentuan entropi ( $\Delta S^\circ$ )

Entropi dapat dihitung dengan plot data antara  $\ln P$  sebagai sumbu y dan  $1/T$  sebagai sumbu x, dimana nilai intersep yang dihasilkan merupakan  $-(2\Delta S_H/R)$ . Berdasarkan grafik diatas, harga  $\Delta S^\circ$  dapat dihitung dari intersep sebagai berikut .

$$a = -\frac{2\Delta S^\circ}{R} = 13,144$$
$$\Delta S^\circ = -\frac{8,314 \times 13,144}{2}$$
$$\Delta S^\circ = -54,6396 \frac{J}{mol \ K}$$

## 3. Penentuan energi bebas ( $\Delta G^\circ$ )

Energi bebas dapat dihitung dengan Persaman M.2

Pada suhu 30°C

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln K_L^\circ = \Delta H_{ads}^\circ - T\Delta S_{ads}^\circ$$
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$
$$\Delta G^\circ = -18610,0576 \text{ J/mol} - 303K(-54,6396 \frac{J}{K \ mol})$$
$$\Delta G^\circ = -2054,2588 \text{ J/mol}$$
$$\Delta G^\circ = -2,054 \text{ kJ/mol}$$

Pada suhu 40°C

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln K_L^\circ = \Delta H_{ads}^\circ - T\Delta S_{ads}^\circ$$
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$
$$\Delta G^\circ = -18610,0576 \text{ J/mol} - 313K(-54,6396 \frac{J}{K \ mol})$$
$$\Delta G^\circ = -1507,8628 \text{ J/mol}$$
$$\Delta G^\circ = -1,508 \text{ kJ/mol}$$

Pada suhu 50°C

$$\Delta G^{\circ}_{ads} = -RT \ln K^{\circ}_L = \Delta H^{\circ}_{ads} - T\Delta S^{\circ}_{ads}$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

$$\Delta G^0 = -18610,0576 \text{ J/mol} - 323\text{K}(-54,6396 \frac{\text{J}}{\text{K mol}})$$

$$\Delta G^0 = -961,4668 \text{ J/mol}$$

$$\Delta G^0 = -0,961 \text{ kJ/mol}$$

Tabel M.2 Tabel perhitungan parameter Termodinamika

T (°C)	T (K)	$\Delta H^0$ (kJ/mol)	$\Delta S^0$ (J/mol K)	$\Delta G^0$ (kJ/mol)
30	303	-18,610	-54,6396	-2,054
40	313			-1,508
50	323			-0,961

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Farradina Choria Suci, lahir di Surabaya tanggal 1 April 1990, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara pasangan Chotim, S.Pd dan Agiriani Wedaringsih. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Rungkut Menanggal III No.618 Surabaya (1996-2002), SLTP Negeri 17 Surabaya (2002-2005) dan SMA Negeri 16 Surabaya (2005-2008). Penulis melanjutkan jenjang pendidikan S1 di Jurusan Kimia FSAINTEK UNAIR melalui jalur PMDK Prestasi pada tahun 2008. Selama kuliah S1, penulis mengambil bidang minat Kimia Fisik. Selama masa studinya penulis aktif

dalam bidang ekstrakurikuler dan kegiatan organisasi. Penulis pernah menjabat sebagai staff Bidang Ketaqwaan OSIS SMPN 17 Surabaya, Ketua Departemen I SKI SMAN 16 Surabaya, Sekretaris II OSIS SMAN 16 Surabaya, staff Bidang Pendidikan, Pembinaan dan Kaderisasi RIMA Surabaya, Sekretaris I RIMA Surabaya, staff Divisi Kerohanian Islam HIMAKI FSAINTEK UNAIR, Kepala Divisi Kerohanian Islam HIMAKI FSAINTEK UNAIR, staff Data dan Informasi UK-MAPANZA UNAIR, Kepala Divisi PSDM UK-MAPANZA UNAIR. Penulis pernah mengikuti pelatihan kepemimpinan seperti LKMM-TD, LKMM-TM, LKMM-TL, serta pelatihan *Spiritual Emotional Freedom Technique* (SEFT) oleh LoGoS Institute. Penulis pernah menjadi trainer *Peer Educator* di Bidang Adiksi Narkoba, Kesehatan Reproduksi dan HIV-AIDS pada Pelajar Surabaya dan pemateri terkait bidang NAPZA. Penulis pernah menjadi penerima dana penelitian 5 PKM-P, 1 PKM-AI oleh DIKTI serta program mahasiswa wirausaha oleh PPKK-UNAIR. Setelah mendapatkan gelar sarjana, penulis melanjutkan studi S2 di Kimia FMIPA-ITS dengan jalur mandiri, kemudian semester berikutnya mendapatkan beasiswa *fresh graduate* hingga akhir masa studi. Penulis tercatat sebagai mahasiswa S2 Kimia angkatan 2012 dengan NRP. 1412 201 204. Pada akhir masa studi, penulis melakukan penelitian dalam bidang minat Kimia Fisik mengenai adsorpsi hidrogen pada material karbon teremplat zeolit dengan aktivasi  $K_2CO_3$ . Penelitian yang dilakukan penulis dibawah bimbingan Ibu Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D.

Email : farradinachoriasuci@gmail.com

Mobile: 0822 4544 5442

0856 4973 3503